

PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DO BRFA EM TRAÇÃO DIRETA PELO RECURSO A ENSAIOS DE FLEXÃO E ARRANCAMENTO

HELENA MARIA BROCHADO COELHO POÇAS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Professora Ana Maria Quintela da Silva Proença Correia de Queirós

Professor Doutor Carlos Filipe Ferreira de Sousa

JULHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor

Aos meus Pais e Irmão

The mind is like an umbrella. Its most useful when open

Walter Gropius

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo apoio incondicional, incentivo e exemplo, são sem dúvida a minha referência.

Ao meu irmão, o meu grande companheiro e um exemplo a seguir.

Aos meus tios Teresa e António pelos seus marcantes e valiosos contributos que sempre me disponibilizaram e que em muito me ajudaram a chegar até aqui.

A toda a minha restante família de quem sempre recebi apoio.

Ao Gonçalo, dele só recebi alegrias, compreensão e incentivos.

À Filipa por todo o seu apoio. Não podia ter tido melhor companhia nesta reta final do nosso curso.

A todos os meus amigos, em especial aqueles que cresceram comigo.

Aos meus orientadores, Professora Ana Maria Proença e Professor Doutor Carlos Ferreira de Sousa, pela disponibilidade, pelo incentivo, pelos conhecimentos que me transmitiram e pelo valioso acompanhamento que sempre me proporcionaram durante a realização deste trabalho.

Aos investigadores José Gomes e Amin Abrishambaf, dos quais recebi importantes e valiosos contributos.

Ao Laboratório de Ensaio de Materiais da FEUP pelo apoio prestado nas tarefas de moldagem dos provetes e ensaios de caracterização dos materiais.

Ao Laboratório de Estruturas da FEUP pelo apoio prestado na realização dos ensaios de *pull-out*.

Agradeço também à N.V. BEKAERT S.A., pelas fibras disponibilizadas, à Eng^a Cristina Barros da SECIL S.A., pelo fornecimento do cimento, do Sr. Arménio Soares da SECIL-Britas S.A., pela disponibilização das britas, ao Eng^o Guilherme Andrade da SORGILA-Sociedade de Argilas S.A. pela disponibilização das areias, à Eng^a Sarah Vanbergen pela realização dos ensaios dos prismas, ao Eng^o Eric Ulrix da BIV Internacional que assegurou o transporte dos prismas e, por fim, à Mc-Bauchemie pelo fornecimento do adjuvante. Foram sem dúvida contributos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O betão reforçado com fibras de aço (BRFA) é um material compósito constituído por uma matriz cimentícia à qual são adicionadas fibras de aço. Esta adição permite a redistribuição das tensões, o aumento da energia absorvida e contribui para o controlo da fissuração, transformando um material tipicamente frágil num material que pode apresentar ductilidade.

No presente trabalho, pretende-se compreender melhor o comportamento face ao arrancamento das fibras com ancoragem em gancho de geometria particular, designadamente as fibras Dramix® 4D e 5D. Deste modo, desenvolveu-se um trabalho experimental, baseado em ensaios de *pull-out*, onde foi avaliada a influência da orientação da fibra, do comprimento de embebimento l_e e da composição da matriz cimentícia.

Uma limitação ao desenvolvimento de modelos de dimensionamento para o BRFA consiste na complexidade associada à caracterização do comportamento à tração do material após a fissuração. Antes da fissuração, o comportamento é descrito por uma relação tensão-extensão ($\sigma - \varepsilon$). Após fissuração, é geralmente descrito pela relação tensão-abertura de fendas ($\sigma - w$). A relação $\sigma - w$ do material pode ser determinada através do ensaio de tração uniaxial. Apesar de este ser o método mais fidedigno, a complexidade associada à sua realização leva a que se tenham procurado alternativas para obtenção desta lei por análise inversa do ensaio de flexão. Assim, foram realizados ensaios de tração por flexão, de acordo com a norma EN 14651, a partir dos quais foi estimada a curva $\sigma - w$ que caracteriza o comportamento do material após a fissuração, em tração direta.

Um segundo método utilizado nesta dissertação para estimar a lei $\sigma - w$ do material em tração direta é baseado na utilização dos resultados dos ensaios de *pull-out*, juntamente com a caracterização do número de fibras efetivas que atravessam uma fissura e da sua orientação.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio de *pull-out*, análise inversa, ensaio de flexão, fibras de aço, betão reforçado com fibras

ABSTRACT

Steel fiber reinforced concrete (SFRC) is a composite material comprising a cementitious matrix and steel fibers. The addition of such fibers allows the redistribution of stresses, the increase of energy absorption and contributes to cracking control, turning a typically brittle material into a material that can exhibit some ductility.

In the present work, the aim is to better understand the *pull-out* mechanism of steel fibers with novel hook geometries, in particular Dramix ® fibers 4D and 5D. An experimental work, based on *pull-out* tests, was developed. The influence of fiber orientation, embedded length and cementitious matrix composition was evaluated.

One limitation to the development of design models for the BRFA consists of the complexity associated to the characterization of the tensile behavior of the material after cracking. Prior to cracking, the behavior is described by a stress-strain relation (σ - ϵ). After cracking, it is usually described by the relation between the tensile stress-crack opening relation (σ - w). The σ - w law can be determined through a uniaxial tensile test. Although this is the most reliable method, the complexity associated to its realization leads to the search for alternatives to obtain this law by inverse analysis of bending tests. Therefore, three-point bending tests were performed, according to the standard EN 14651, from which the σ - w curve (which defines the material behavior in direct tension) was estimated.

A second method used in this dissertation to estimate the σ - w law in direct tension is based on using the results of *pull-out* tests, and the characterization of the number of effective fibers crossing a crack and their orientation.

KEYWORDS: *Pull-out* test, inverse analysis, bending test, steel fiber, fiber reinforced concrete

ÍNDICE GERAL

| | |
|----------------------|-----|
| AGRADECIMENTOS | I |
| RESUMO | III |
| ABSTRACT | V |

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Introdução | 1 |
| 1.1. TEMÁTICA | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIA | 2 |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO | 3 |

| | |
|---|----------|
| Betão Reforçado com Fibras de Aço | 5 |
| 2.1. INTRODUÇÃO | 5 |
| 2.2. DEFINIÇÃO E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS | 5 |
| 2.3. TIPOS DE FIBRAS | 6 |
| 2.4. PARÂMETROS CONDICIONANTES DO COMPORTAMENTO DO BRFA | 9 |
| 2.4.1. PROPRIEDADES DAS FIBRAS | 9 |
| 2.4.2. PROPRIEDADES DO BETÃO | 10 |
| 2.4.3. ORIENTAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS | 10 |
| 2.4.4. DOSAGEM DE FIBRAS | 15 |

| | |
|---|-----------|
| ENSAIO DE <i>PULL-OUT</i> DE UMA FIBRA | 17 |
| 3.1. INTRODUÇÃO | 17 |
| 3.2. COMPORTAMENTO DE FIBRAS LISAS E FIBRAS COM GANCHO | 18 |
| 3.3. EFEITO DA ORIENTAÇÃO E COMPRIMENTO DE EMBEBIMENTO DA FIBRA | 19 |
| 3.4. EFEITO DO TIPO DE FIBRA E MATRIZ CIMENTÍCIA | 22 |

| | |
|--|-----------|
| ENSAIO DE FLEXÃO DE PRISMAS DE BRFA | 25 |
| 4.1. INTRODUÇÃO | 25 |
| 4.2. ENSAIO DE FLEXÃO DE PRISMAS COM ENTALHE | 25 |
| 4.3. ESTIMATIVA DA RELAÇÃO σ - w RECORRENDO A UMA ANÁLISE INVERSA | 29 |

| | |
|--|-----------|
| CARACTERIZAÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL | 33 |
|--|-----------|

| | |
|--|-----------|
| 5.1 INTRODUÇÃO | 33 |
| 5.1. CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA | 33 |
| 5.2. PLANO DE ENSAIOS..... | 35 |
| 5.2.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO ENDURECIDO | 35 |
| 5.2.2. ENSAIO DE <i>PULL-OUT</i> | 36 |
| 5.2.3. ANÁLISE DE IMAGEM | 38 |

Resultados experimentais 43

| | |
|--|-----------|
| 6.1. INTRODUÇÃO | 43 |
| 6.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO ENDURECIDO | 43 |
| 6.2.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO | 43 |
| 6.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE | 44 |
| 6.2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO DIRETA..... | 45 |
| 6.2.4 ENSAIO DE TRAÇÃO FOR FLEXÃO..... | 45 |
| 6.2.5. SÍNTESE | 47 |
| 6.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS COMPLEMENTARES | 47 |
| 6.3.1. BETÃO A-5D..... | 47 |
| 6.3.1.1. Ensaio de flexão | 47 |
| 6.3.1.2. Ensaio de <i>pull-out</i> | 51 |
| 6.3.1.3. Análise de imagem | 56 |
| 6.3.2. BETÃO A-4D..... | 58 |
| 6.3.2.1. Ensaio de flexão | 58 |
| 6.3.2.2. Ensaio de <i>Pull-out</i> | 61 |
| 6.3.3. BETÃO B-5D..... | 63 |
| 6.3.3.1. Ensaio de Flexão..... | 63 |
| 6.3.3.2. Ensaio de <i>Pull-out</i> | 66 |
| 6.3.3.3. Análise de imagem | 68 |

Discussão de Resultados 71

| | |
|---|-----------|
| 7.1. INTRODUÇÃO | 71 |
| 7.2. INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO, TIPO DE FIBRA E MATRIZ CIMENTÍCIA NOS ENSAIOS DE PULL-OUT | 71 |
| 7.3. INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRA E MATRIZ UTILIZADA NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO POR FLEXÃO | 77 |

| | |
|--|---------------|
| Análise inversa dos resultados | 79 |
| 8.1. INTRODUÇÃO | 79 |
| 8.2. MISTURA A-5D | 80 |
| 8.3. MISTURA A-4D | 84 |
| 8.4. MISTURA B-5D | 85 |
| 8.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS | 89 |
| Conclusões e desenvolvimentos futuros | 91 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 93 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Sede da Televisão Central da China (CCTV) em Pequim..... | 2 |
| Figura 2.1: Exemplos de superfícies das fibras e de geometrias das extremidades, (Naaman, 2003) . | 6 |
| Figura 2.2: Exemplos de secções transversais das fibras, (Naaman, 2003)..... | 6 |
| Figura 2.3: Geometria da extremidade das fibras Dramix® (Bekaert, 2012)..... | 7 |
| Figura 2.4: Curva tração-extensão para fibras 3D, 4D e 5D, adaptado de (Bekaert, 2012)..... | 8 |
| Figura 2.5: Esquema relativo ao funcionamento característico das fibras 3D e 5D. | 8 |
| Figura 2.6: Curva tensão-extensão das fibras 3D,4D e 5D e dos aços A400 NR SD e A500 NR SD. ... | 9 |
| Figura 2.7: Propriedades condicionantes na performance do compósito..... | 9 |
| Figura 2.8: Influência do escoamento do betão na orientação das fibras,(Stähli <i>et al.</i> , 2008;Abrishambaf, 2015). | 11 |
| Figura 2.9: Influência da vibração na orientação das fibras, (Soroushian e Lee, 1990;Abrishambaf, 2015). | 11 |
| Figura 2.10: Secção transversal dividida nas diferentes zonas de orientação, (Dupont e Vandewalle, 2005) | 12 |
| Figura 2.11: Determinação do fator de orientação para fibras na zona 1 (Dupont e Vandewalle, 2005). | 14 |
| Figura 2.12: Fibra com uma condição fronteira. | 14 |
| Figura 3.1: Exemplos de configurações do ensaio de pull-out, (Groth, 2000;Ferreira, 2008) | 17 |
| Figura 3.2: Comportamento ao <i>pull-out</i> de fibras lisas, adaptado de (Löfgren, 2005). | 18 |
| Figura 3.3: Comparação dos comportamentos de fibras lisas e fibras com extremidade em gancho, adaptado de (Löfgren, 2005)..... | 19 |
| Figura 3.4: Efeito <i>snubbing</i> , adaptado de (Dupont, 2003). | 19 |
| Figura 3.5: Efeitos de <i>snubbing</i> e <i>spalling</i> , adaptado de (Abrishambaf, 2015) | 20 |
| Figura 3.6: Influência da orientação em ensaios de <i>pull-out</i> de fibras com gancho, com $l_e=15\text{mm}$, adaptado de (Robins, Austin <i>et al.</i> , 2002) | 20 |
| Figura 3.7: Efeito de <i>snubbing</i> versus efeito de <i>spalling</i> , adaptado de (Dupont, 2003) | 21 |
| Figura 3.8: Influência do comprimento de embebimento no ensaio de <i>pull-out</i> de fibras sujeitas a várias inclinações, adaptado de (Robins, Austin <i>et al.</i> , 2002) | 21 |
| Figura 3.9: Curvas médias do ensaio de <i>pull-out</i> de fibras Dramix® 3D, 4D e 5D..... | 22 |
| Figura 3.10:Deformação do gancho de ancoragem após <i>pull-out</i> , adaptado de Abdallah e Fan (2017). | 23 |
| Figura 4.1: Posicionamento do entalhe no provete, adaptado da norma EN 14651: 2007 | 26 |
| Figura 4.2: Configuração do ensaio de flexão com medição de CMOD, adaptado da norma EN 14651: 2007 | 26 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.3: Configuração do ensaio de flexão com medição da flecha, adaptado da norma EN 14651: 2007 | 27 |
| Figura 4.4: Modo de obtenção do valor F_L de acordo com a norma EN 14651: 2007 | 28 |
| Figura 4.5: Diagrama carga-CMOD, EN 14651: 2007 | 28 |
| Figura 4.6: Utilização da análise inversa para obter uma estimativa do comportamento uniaxial do BRFA tracionado. Figura adaptada de Amin, Foster <i>et al.</i> (2015) | 29 |
| Figura 4.7: Proposta de Amin, Foster <i>et al.</i> (2015) para caracterizar, de um modo simplificado, a parte inicial da relação σf_w | 30 |
| Figura 4.8: Ilustração do modelo de cálculo utilizado na análise inversa | 31 |
| Figura 5.1: Moldes utilizados na preparação dos provetes para ensaios de <i>pull out</i> | 36 |
| Figura 5.2: Configuração utilizada para o ensaio de <i>pull-out</i> | 37 |
| Figura 5.3: Obtenção das faces para análise de imagem. | 38 |
| Figura 5.4: Etapas da análise de imagem. | 40 |
| Figura 6.1: Resultados do ensaio de flexão para a composição A-5D | 48 |
| Figura 6.2: Relação entre o NE+NR e as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$ | 49 |
| Figura 6.3: Fenda do ensaio de flexão para um CMOD de 3,5 mm e para o final do ensaio. | 50 |
| Figura 6.4: Relação entre o número de fibras total e as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$ | 50 |
| Figura 6.5: Ensaio de <i>pull-out</i> realizado para a composição A-5D, para $l_e=15$ mm. | 52 |
| Figura 6.6: Ensaio de <i>pull-out</i> realizado para a composição A-5D, para $l_e=15$ mm, com $\theta = 30^\circ$ | 53 |
| Figura 6.7: Ensaio de <i>pull-out</i> do provete A-5D-5, com $\theta = 60^\circ$ | 54 |
| Figura 6.8: Ensaio de <i>pull-out</i> para a composição A-5D, para $l_e=30$ mm. | 55 |
| Figura 6.9: Histogramas correspondentes à distribuição do número de fibras para cada inclinação.... | 58 |
| Figura 6.10: Resultados dos ensaios de tração por flexão para a composição A-4D | 59 |
| Figura 6.11: Relação entre NE+NR e as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$ | 60 |
| Figura 6.12: Relação entre o número total de fibras e as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$ | 61 |
| Figura 6.13: Ensaio de <i>pull-out</i> realizado para a composição A-4D, para $l_e=15$ mm. | 62 |
| Figura 6.14: Resultados dos ensaios de flexão para a composição B-5D. | 63 |
| Figura 6.15: Relação entre o número de fibras efetivas e as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$ | 65 |
| Figura 6.16: Relação entre o número total de fibras e as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$ | 66 |
| Figura 6.17: Ensaio de <i>pull-out</i> realizado para a composição B-5D para um $l_e=15$ mm. | 67 |
| Figura 6.18: Histogramas correspondentes à distribuição do número de fibras para cada inclinação . | 69 |
| Figura 7.1: Evolução da força máxima e respetivo deslizamento, em função da inclinação. | 71 |
| Figura 7.2: Diagramas médios do ensaio de <i>pull-out</i> para os 60° de inclinação e $l_e=15$ mm. | 72 |
| Figura 7.3: Aspeto das fibras após ensaio de <i>pull-out</i> | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 7.4: Diagramas médios do ensaio de <i>pull-out</i> das composições A-5D e B-5D com um $l_e=15$ mm. | 74 |
| Figura 7.5: Diagramas médios do ensaio de <i>pull-out</i> relativos à composição A para os $l_e = 15$ e 30 mm. | 75 |
| Figura 7.6: Comparação do comportamento das fibras 4D e 5D no ensaio de <i>pull-out</i> , para um $l_e=15$ mm. | 76 |
| Figura 7.7: Diagramas médios do ensaio de <i>pull-out</i> para as várias composições. | 77 |
| Figura 8.1: Curva $\sigma - w$ obtida por análise inversa do ensaio de flexão do provete A-5D-1. | 81 |
| Figura 8.2: Curva $\sigma - w$ obtida por análise inversa dos ensaios de tração por flexão e <i>pull-out</i> . | 83 |
| Figura 8.3: Curva $\sigma - w$ obtida por análise inversa dos ensaios de flexão e <i>pull-out</i> . | 85 |
| Figura 8.4: Curva $\sigma - w$ obtida por análise inversa dos ensaios de tração por flexão e <i>pull-out</i> . | 87 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1.1: Tabela resumo dos ensaios realizados..... | 3 |
| Tabela 5.1: Constituintes das várias composições de betão | 34 |
| Tabela 5.2: Propriedades das fibras Dramix® 4D e 5D | 34 |
| Tabela 5.3: Tabela resumo dos ensaios realizados..... | 35 |
| Tabela 5.4: Ensaios de caracterização do betão endurecido. | 36 |
| Tabela 5.5: Velocidades adotadas no ensaio de <i>pull-out</i> para $l_e=15\text{mm}$ | 38 |
| Tabela 5.6: Velocidades adotadas no ensaio de <i>pull-out</i> para $l_e=30\text{ mm}$ | 38 |
| Tabela 6.1: Resultados do ensaio de compressão em cubos, aos 28 dias de idade | 44 |
| Tabela 6.2: Resultados do ensaio de compressão em cilindros, aos 28 dias de idade | 44 |
| Tabela 6.3: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade, aos 28 dias de idade | 44 |
| Tabela 6.4: Resultados do ensaio de tração direta em cilindros, aos 28 dias de idade | 45 |
| Tabela 6.5: Resultados do ensaio de flexão em prismas, aos 28 dias de idade | 46 |
| Tabela 6.6: Síntese de resultados obtidos nos ensaios de caracterização, aos 28 dias de idade. | 47 |
| Tabela 6.7: Número de fibras que atravessam a secção de rotura, por unidade de área..... | 48 |
| Tabela 6.8: Número de fibras que atravessam as secções próximas do entalhe, por unidade de área. | 57 |
| Tabela 6.9: Número de fibras por unidade de área que atravessam a secção de rotura..... | 59 |
| Tabela 6.10: Número de fibras que atravessam a secção de rotura por unidade de área..... | 64 |
| Tabela 6.11: Número de fibras que atravessam a secção do entalhe por unidade de área. | 69 |
| Tabela 7.1: Comparação do valor médio da força máxima de arrancamento em fibras 5D obtido nas composições A e B e no trabalho de Abdallah e Fan (2017)..... | 77 |
| Tabela 8.1: Parâmetros resultantes da análise inversa do ensaio de flexão do betão A-5D. | 81 |
| Tabela 8.2. Resultado da contagem de fibras para cada intervalo de inclinações..... | 82 |
| Tabela 8.3: Coeficientes determinados na análise inversa do ensaio de <i>pull-out</i> do betão A-5D. | 82 |
| Tabela 8.4: Parâmetros obtidos na análise inversa do ensaio de flexão do betão A-4D. | 84 |
| Tabela 8.5. Resultado da contagem de fibras para cada intervalo de inclinações..... | 84 |
| Tabela 8.6: Parâmetros determinados na análise inversa do ensaio de <i>pull-out</i> do betão A-4D..... | 85 |
| Tabela 8.7: Parâmetros adotados na análise inversa do ensaio de flexão do betão A-5D..... | 86 |
| Tabela 8.8: Parâmetros obtidos na análise inversa do ensaio de flexão do betão B-5D. | 86 |
| Tabela 8.9. Resultado da contagem de fibras para cada intervalo de inclinações..... | 86 |
| Tabela 8.10: Parâmetros adotados na análise inversa do ensaio de <i>pull-out</i> do betão B-5D..... | 87 |
| Tabela 8.11: Parâmetros obtidos na análise inversa do ensaio de flexão do betão B-5D. | 89 |

| | |
|---|----|
| Tabela 8.12: Parâmetros obtidos na análise inversa do ensaio de <i>pull-out</i> | 89 |
|---|----|

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Letras Latinas Maiúsculas

A_f – Secção de uma fibra

E – Módulo de elasticidade

E_{fibra} – Módulo de elasticidade da fibra

E_m – Módulo de elasticidade médio

E_{matriz} – Módulo de elasticidade da matriz

F_{max} – Força máxima (pull-out)

L_{cs} - Comprimento característico

$R_{m,nom}$ – Resistência à tração das fibras

V_f – Fração volúmica de fibras

Letras Latinas Minúsculas

a_g – dimensão máxima do agregado

b – Largura da secção transversal do molde

d_f – Diâmetro das fibras

dA – Contribuição da área

$f_{c,cilindro}$ – Resistência à compressão em cilindros

$f_{c,cubo}$ – Resistência à compressão em cubos

$f_{cm,cilindro}$ – Valor médio da resistência à compressão em cilindros

$f_{cm,cubo}$ – Valor médio da resistência à compressão em cubos

f_{ct} – Resistência à tração do betão.

f_L – Tensão limite de proporcionalidade

f_R – Tensão residual

$f_{R,1}$ – Tensão residual correspondente a um CMOD=0,5 mm no ensaio segundo a EN 14651: 2007

$f_{R,2}$ – Tensão residual correspondente a um CMOD=1,5 mm no ensaio segundo a EN 14651: 2007

$f_{R,3}$ – Tensão residual correspondente a um CMOD=2,5 mm no ensaio segundo a EN 14651: 2007

$f_{R,4}$ – Tensão residual correspondente a um CMOD=3,5 mm no ensaio segundo a EN 14651: 2007

f_t – Resistência à tração direta

$f_{t,m}$ – Resistência média à tração direta

h – Altura da secção transversal do molde

h_{sp} – Altura do entalhe

k_{ef} - Fator de ajuste

k_h – Fator dimensão

l – Comprimento do vão

l_e – Comprimento de embebimento da fibra no betão

l_f – Comprimento das fibras

n – Número de fibras por unidade de superfície

s – Espaçamento entre fibras

w – Abertura de fenda

Letras Gregas

α – Fator de orientação

δ – Valor da flecha

ε – Extensão

Θ – Ângulo da fibra em relação ao eixo longitudinal

ρ – Volume de fibras

$\sigma_c(w)$ - Tensão transferida pelo betão

$\sigma_f(w)$ - Tensão transferida pelas fibras

σ_{uf} – Resistência à tração da fibra

σ_{um} – Resistência à tração da matriz

Abreviaturas e Acrónimos

BRF – Betão Reforçado com Fibras

BRFA – Betão Reforçado com Fibras de Aço

CMOD – Crack Mouth Opening Displacement

C.V. – coeficiente de variação

LOP - Limite de proporcionalidade

NE – Número de fibras efetivas

NR – Número de fibras em rotura

NT – Número de fibras total

PVC – Policloreto de vinil

RILEM – União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais de Construção, Sistemas e Estruturas

XPS – Poliestireno extrudido

ZTI – Zona de transição interfacial

1

INTRODUÇÃO

1.1. TEMÁTICA

O conceito de reforço de uma matriz frágil com fibras remonta aos primórdios da construção, onde fibras naturais eram adicionadas a barro para reforço de tijolos. Foi, no entanto, no início da década de 60 que Romauldi e Batson apresentaram os primeiros estudos onde fibras de aço foram adicionadas a uma matriz cimentícia, (Htut, 2010). Estas experiências envolveram fibras lisas de aço e rapidamente se verificou o aumento da ductilidade e tenacidade associada a este material compósito, quando é feito com uma dosagem de fibras adequada e estas apresentam uma distribuição uniforme.

Correntemente, com a evolução verificada nesta indústria, são inúmeras as aplicações de betão reforçado com fibras de aço (BRFA), nomeadamente:

- em estruturas muito esbeltas (Figura 1.1), onde não é possível o uso de armadura convencional (Bentur e Mindess, 2006);
- em estruturas solicitadas localmente por cargas de valor elevado, tais como o revestimento de túneis e estruturas resistentes a explosões (Igarashi *et al.*, 1996);
- controlo de fendilhação por retração do betão, por exemplo, em lajes de pavimento. Geralmente estas estruturas apresentam extensas áreas e estão sujeitas a fortes restrições à sua deformação por retração, apresentando por isso um elevado potencial de fissuração (Li, 2002);
- reforço antissísmico de estruturas, devido ao aumento da ductilidade associado a este material, bem como ao seu comportamento vantajoso após fissuração, pois a adição de fibras ao betão reduz consideravelmente o seu destacamento quando é submetido a deformações elevadas.

Na Figura 1.1 pode-se observar a torre CCTV, em Pequim, no qual foram utilizadas fibras de aço como complemento de reforço, para dar resposta ao desafio estrutural que a construção deste edifício constituiu, não só pela forma pouco convencional mas especialmente por se encontrar numa zona sísmica.



Figura 1.1: Sede da Televisão Central da China (CCTV) em Pequim.

É importante realçar que a evolução da indústria nesta área levou ao aparecimento de novos modelos de fibra, com diferentes geometrias e propriedades mecânicas. O seu estudo, para melhor compreensão dos mecanismos de reforço que lhe estão associados, é fundamental para garantir a utilização de todo o seu potencial.

1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIA

Com este trabalho pretende-se concretizar dois objetivos principais:

- Melhor compreender o comportamento face ao arrancamento das fibras Dramix® 4D e 5D, no que diz respeito à influência da orientação da fibra, ao comprimento de embebimento l_e e à composição da matriz cimentícia.
- Obter uma estimativa do comportamento uniaxial do BRFA, por análise inversa dos ensaios de tração por flexão e de arrancamento (*pull-out*).

Para concretização dos objetivos enunciados recorreu-se a ensaios de *pull-out* e de tração por flexão, estudando três composições distintas, designadamente A-5D, A-4D e B-5D. O número de ensaios realizados para cada composição é apresentado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Tabela resumo dos ensaios realizados.

| Ensaio | | | Composições | | | |
|----------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|------|------|---|
| | | | A-5D | A-4D | B-5D | |
| Pull-out | $l_e=15$ mm | $\Theta=0^\circ$ | 6 | 6 | 6 | |
| | | $\Theta=30^\circ$ | 6 | 6 | 6 | |
| | | $\Theta=60^\circ$ | 6 | 6 | 6 | |
| | $l_e=30$ mm | Moldes individuais | $\Theta=0^\circ$ | 3 | | |
| | | | $\Theta=30^\circ$ | 3 | - | - |
| | | | $\Theta=60^\circ$ | 3 | | |
| | | Provetes obtidos por carotagem | $\Theta=0^\circ$ | 6 | | |
| | | | $\Theta=30^\circ$ | 6 | - | - |
| | | | $\Theta=60^\circ$ | 6 | | |
| | Tração por flexão | | 6 | 6 | 9 | |

Nos ensaios de *pull-out*, para cada composição, realizaram-se 6 ensaios para cada uma das inclinações 0° , 30° e 60° e l_e de 15 mm, num total de 18 ensaios.

Adicionalmente, foram feitos 27 ensaios para a composição A-5D com um l_e de 30 mm e nos quais se variou o método de betonagem. Em 9 destes ensaios, os provetes foram retirados por carotagem de um bloco de betão. Nos restantes 18, foram moldados individualmente.

Nos ensaios de tração por flexão, foram testados 6 prismas para a composição A-5D, 6 para a A-4D e 9 para a B-5D.

1.3. ORGANIZAÇÃO

Esta dissertação pode ser dividida em 4 partes distintas. Na primeira, correspondente aos capítulos 2, 3 e 4, é feito um enquadramento teórico, no qual se explica o comportamento do BRFA e o comportamento de fibras convencionais ao arrancamento. Apresenta-se também uma explicação sobre o ensaio de tração utilizado, bem como se descreve o modelo selecionado para a análise inversa desse mesmo ensaio.

Na segunda parte, correspondente aos capítulos 5, 6 e 7, começa-se por fazer uma caracterização das misturas utilizadas e também do plano de ensaios realizado. Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios efetuados no trabalho experimental e, por fim, discutem-se esses resultados.

Na terceira parte, correspondente ao capítulo 8, é feita a análise inversa dos ensaios de tração por flexão e de *pull-out*, comentando-se o resultado conseguido.

Finalmente, a quarta parte, no 9º capítulo, é dedicada às diferentes conclusões que se podem retirar do presente trabalho.

2

BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo descrevem-se os aspetos fundamentais do comportamento do BRFA e os principais parâmetros que determinam o seu comportamento, nomeadamente o tipo de fibra, as propriedades da matriz cimentícia, a orientação e distribuição das fibras e a respetiva dosagem.

É importante notar que esta é uma descrição de natureza geral, podendo haver diferenças importantes consoante o tipo de materiais utilizados. Isto acontece especialmente quando se empregam fibras com propriedades particulares, como é o caso das fibras DRAMIX 5D, que possuem um gancho que lhes confere grande capacidade de amarração e são fabricadas com um aço de elevada ductilidade e resistência.

2.2. DEFINIÇÃO E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

O BRFA é um material compósito constituído por uma matriz de betão à qual são adicionadas fibras de aço. A adição de fibras ao betão aumenta a ductilidade do material e permite um maior controlo da abertura de fendas, melhorando assim as suas características mecânicas, em especial no comportamento à tração (Naaman *et al.*, 1991).

A grande mais valia do BRFA é a sua elevada tenacidade, traduzida pela área total compreendida abaixo da curva tensão-extensão, ou seja, a capacidade do material para absorver energia no domínio plástico até à rotura (Dupont, 2003). Assim, a componente de reforço das fibras é sentida maioritariamente após a fendilhação, isto é, a presença das fibras impede a rotura frágil, típica da matriz de betão.

Com o aumento da abertura de uma fenda, as fibras são solicitadas por esforços de tração. Então, as fibras funcionam como uma ponte de tensões, contribuindo para o controlo da abertura da fenda. Ao longo de uma fissura, é natural existirem fibras que se encontram em diferentes fases do seu comportamento, nomeadamente quando a abertura da fissura varia ao longo do seu desenvolvimento e por causa das diferentes orientações apresentadas pelas diversas fibras. Este processo promove uma redistribuição de esforços de umas fibras para outras, ao longo do processo de carregamento (ou de atuação de deformações impostas que conduzam à abertura progressiva de uma fissura). Para aberturas elevadas da fissura, pode ocorrer a rotura do aço das fibras, ou o seu arrancamento

2.3. TIPOS DE FIBRAS

Atualmente o mercado tem disponível uma vasta gama de fibras que, conforme o tipo de material usado no seu fabrico e a sua geometria, se adequam a diferentes funções. Quanto ao tipo de material, as fibras podem ser classificadas em cinco grupos (Löfgren, 2005):

- metálicas (aço);
- vidro;
- sintéticas (acrílico, aramida, carbono, nylon, poliéster, polietileno, polipropileno, acetato de polivinil);
- naturais orgânicas (madeira, coco, bambu, juta);
- naturais inorgânicas (amianto, wollastonite).

O material mais utilizado em aplicações estruturais é claramente o aço.

A geometria da fibra é uma propriedade de grande relevância para a adesão à matriz cimentícia. Existem fibras com secção circular (com diâmetro, d_f , que geralmente não ultrapassa os 0,9 mm), retangular, triangular e poligonal. A secção mais comum é a circular. As superfícies variam também, apresentando-se lisas, rugosas, indentadas, onduladas ou torcidas. As fibras podem ser retas ou apresentar extremidades deformadas com o objetivo de melhorar o seu desempenho. O tipo de ancoragem mais comum é o gancho, havendo também casos de fibras com extremidades em forma de pá ou botão (Naaman, 2003; Löfgren, 2005). Uma extremidade em gancho permite uma deformação da fibra, aumentando a sua absorção de energia e, em consequência, melhora o comportamento do compósito.

A Figura 2.1e a Figura 2.2 apresentam as geometrias referidas.

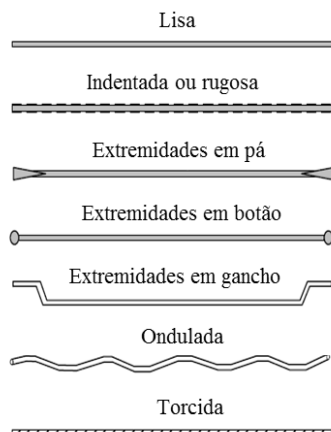


Figura 2.1: Exemplos de superfícies das fibras e de geometrias das extremidades, (Naaman, 2003)

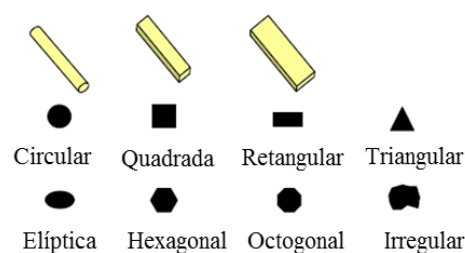


Figura 2.2: Exemplos de secções transversais das fibras, (Naaman, 2003)

As fibras de aço podem ainda ser classificadas em diferentes grupos, segundo a norma NP EN 14889:2008, conforme o material de base na sua produção:

- Grupo I: fio estirado a frio
- Grupo II: fio cortado de chapa
- Grupo III: fio extraído a quente
- Grupo IV: fio estirado a frio por aplainamento
- Grupo V: fio extraído de blocos de aço por fresagem

O presente trabalho incide sobre BRFA com funções estruturais, com uma capacidade significativa de retenção de tensões de tração após a fissuração. Assim, são utilizadas fibras de aço dos tipos Dramix® 4D e 5D, por serem adequadas a funções estruturais, uma vez que apresentam elevada resistência, um elevado módulo de elasticidade (comparativamente a fibras não metálicas) e, no caso das fibras 5D, uma elevada ductilidade.

As fibras Dramix® podem assumir três modelos diferentes, 3D, 4D ou 5D, que apresentam igualmente diferentes geometrias, resistências e ductilidades, o que implica distintos comportamentos no reforço.

A denominação 3D, 4D e 5D, entre outros parâmetros, relaciona-se com o número de segmentos de reta que compõem a ancoragem, isto é, as fibras apresentam três, quatro ou cinco segmentos na ancoragem, respetivamente, como se pode ver na Figura 2.3.



Figura 2.3: Geometria da extremidade das fibras Dramix® (Bekaert, 2012).

O aço utilizado em cada tipo de fibra, 3D, 4D ou 5D, apresenta um comportamento muito distinto, conforme é visível na Figura 2.4. A combinação da geometria do gancho e do tipo de material conduz a diferentes comportamentos no reforço, que implicam também uma escolha adequada da composição da matriz cimentícia. A Figura 2.5 ilustra os diferentes comportamentos obtidos com fibras 3D e 5D.

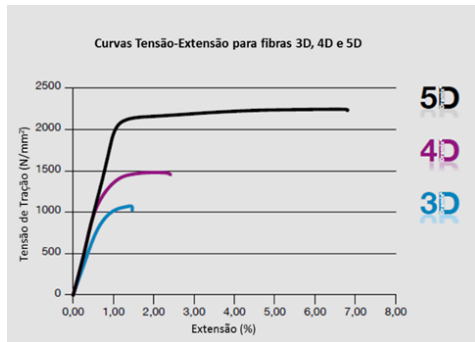


Figura 2.4: Curva tração-extensão para fibras 3D, 4D e 5D, adaptado de (Bekaert, 2012).

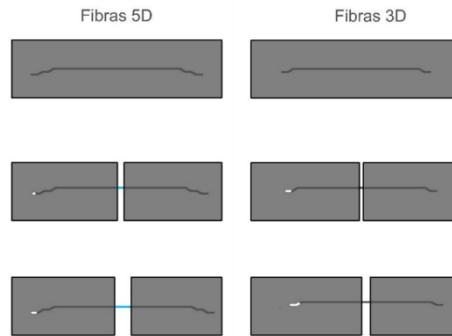


Figura 2.5: Esquema relativo ao funcionamento característico das fibras 3D e 5D.

As fibras 3D, adequadas ao uso em betões correntes, funcionam através da deformação do gancho de extremidade e também por fricção entre o betão e a fibra, como é indicado na Figura 2.5, permitindo um incremento da energia absorvida pelo compósito. Este mecanismo permite um aumento da abertura de fenda na força máxima comparativamente àquela que ocorreria se não existisse deslizamento entre a fibra e a matriz cimentícia.

Já nas fibras 5D, destinadas ao reforço de betões de alta resistência, o aperfeiçoamento da configuração do gancho garante a otimização da aderência na ancoragem. Ao mesmo tempo, estas fibras são fabricadas com um aço de elevada ductilidade e resistência, apresentando um princípio de funcionamento diferente. As extremidades promovem uma forte ancoragem das extremidades da fibra e a deformação ocorre essencialmente ao longo do corpo da fibra. As fibras 5D promovem assim um funcionamento muito vantajoso, uma vez que se consegue um aumento considerável da extensão na força máxima graças à ductilidade do aço. Note-se que este é o comportamento patente em condições de serviço. A rotura do compósito pode ocorrer quer por deformação do gancho de ancoragem e consequente arrancamento da fibra, quer por fratura da mesma.

Uma grande mais-valia do tipo de fibra 5D é o facto de o aço que a constitui ser capaz de combinar uma elevada resistência e ductilidade.

Por último, as fibras 4D, utilizadas em betões de resistência intermédia, combinam o funcionamento por deformação do gancho das fibras 3D com um aço com alguma ductilidade, constituindo uma solução intermédia relativamente às anteriores.

Na Figura 2.6 é feita uma comparação do comportamento à tração dos 3 modelos de fibras Dramix com aços para armaduras ordinárias de ductilidade especial, A400 NR SD e A500 NR SD. Verifica-se que os três tipos de fibras resistem a tensões mais elevadas que os aços. Salienta-se, ainda, a capacidade das fibras 5D de, atendendo ao valor elevado de carga suportada, permitirem uma extensão considerável, mesmo quando comparada com os aços de ductilidade especial.

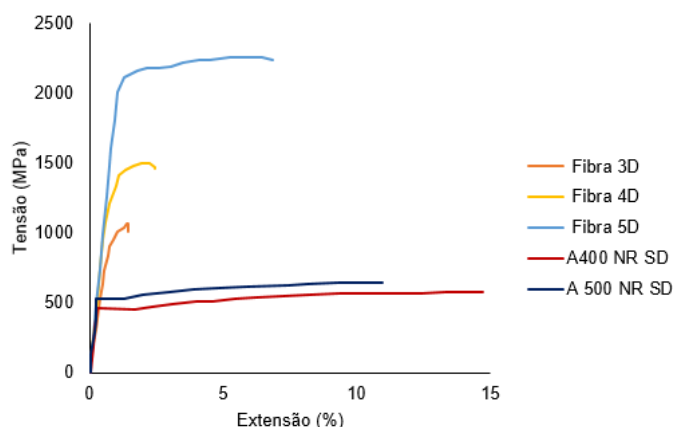


Figura 2.6: Curva tensão-extensão das fibras 3D,4D e 5D e dos aços A400 NR SD e A500 NR SD.

2.4. PARÂMETROS CONDICIONANTES DO COMPORTAMENTO DO BRFA

A obtenção de um BRFA com um bom comportamento estrutural passa por um estudo cuidadoso das propriedades dos materiais que o compõe. Os parâmetros que mais condicionam a sua performance são apresentados na Figura 2.7. Nesta tabela, a variável σ_{uf} representa a tensão resistida pela fibra, σ_{um} é a tensão resistida pela matriz, e E é o módulo de elasticidade.

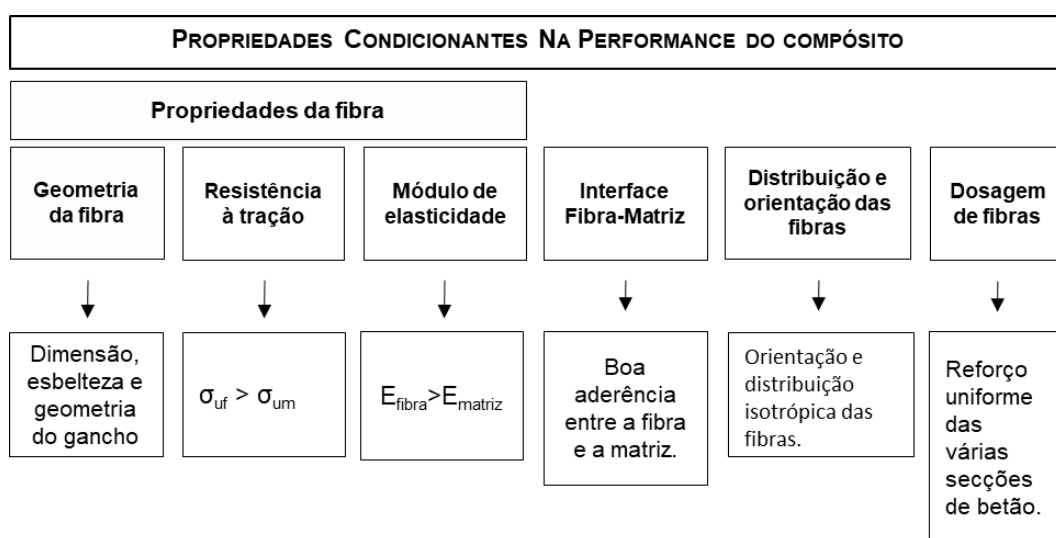


Figura 2.7: Propriedades condicionantes na performance do compósito

2.4.1. PROPRIEDADES DAS FIBRAS

A resistência à tração, o módulo de elasticidade e a geometria são as propriedades das fibras que mais influenciam o desempenho do BRFA.

Para o bom funcionamento do conjunto, a tensão de tração resistida pela fibra tem de ser muito superior à da matriz. Além disso, é importante que a fibra se deforme, sem exibir rotura súbita. Por este motivo,

quando se combinam betões de elevada classe de resistência com fibras com forte capacidade de ancoragem, é necessário o uso de um aço de muito alta resistência e ductilidade.

Por outro lado, uma vez que se pretende o controlo da abertura de fendas, é imperativo o uso de um material com elevado módulo de elasticidade, pois só assim a fibra resiste a valores elevados de tensão de tração para pequenas deformações.

Além das propriedades geométricas já referidas no capítulo 2.2. – forma, secção e tipo de ancoragem – a esbelteza (razão do comprimento pelo diâmetro), também condiciona o funcionamento do compósito. Um diâmetro menor permite um maior número de fibras por unidade de peso, tornando mais densa a sua estrutura no compósito. Ao mesmo tempo, um maior comprimento proporciona uma maior aderência da fibra, sendo que o seu valor mínimo deve ser aproximadamente três vezes o valor da máxima dimensão do agregado. Desta forma, garante-se o seu funcionamento como uma ponte de tensões de uma fenda situada entre agregados, uma vez tratar-se de uma zona mais propensa à fendilhação (Vanderwalle, 2005).

2.4.2. PROPRIEDADES DO BETÃO

A capacidade resistente da fibra é um fator necessário, mas não suficiente para o bom funcionamento do compósito.

A boa aderência entre os constituintes do BRFA, é um parâmetro crucial na obtenção de um produto final de qualidade.

As fibras podem ser vistas como um agregado de forma especial. Assim sendo, deve ter-se especial cuidado na preparação da composição de betão. Uma adequada quantidade de finos promove a boa aderência, sendo por isso apropriado o uso de adições de qualidade.

Deve também haver o cuidado de produzir uma mistura que, quer seja fluida ou não, apresente elevada compacidade. Ao mesmo tempo, é fundamental que não ocorra segregação ou exsudação do betão. Como já referido anteriormente, as fibras tendem a comportar-se como agregados de forma particular. Assim, à semelhança do que acontece no betão simples, na presença de fenómenos destes, a água tende a alojar-se na vizinhança da fibra o que, após evaporação, dará lugar a vazios no betão e consequentemente a zonas de instabilidade no material.

2.4.3. ORIENTAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS

Uma das propriedades mais importantes do BRFA é a sua capacidade de transferir esforços, de forma relativamente uniforme, através de uma secção fendilhada, o que depende não só das propriedades mecânicas da fibra, mas também da sua orientação e distribuição no betão (Dupont e Vandewalle, 2005).

O BRFA apresenta maior resistência pós-fissuração se as fibras estiverem orientadas na direção das tensões principais atuantes. Porém, uma vez que na prática as estruturas são solicitadas em várias direções, procura-se que o material seja isotrópico. Para isso, as fibras devem ser distribuídas uniformemente no betão e orientadas em todas as direções.

A dispersão e orientação das fibras, após endurecimento do betão, são consequência de uma série de etapas que compõe os processos de amassadura e moldagem, nomeadamente as propriedades do betão fresco após amassadura, as condições de moldagem, a fluidez do betão e a vibração e efeito parede provocado pelos moldes (Laranjeira, 2010).

Segundo Stroeven e Hu (2006), a moldagem é uma etapa onde ocorre uma grande perturbação da orientação e distribuição das fibras, uma vez que tanto o escoamento do betão sobre o molde (Figura 2.8) como as ações dinâmicas realizadas para o seu correto enchimento, designadamente a vibração, alteram a disposição inicial das fibras. Por exemplo, quando a direção de vibração é vertical as fibras tendem a alinhar-se na horizontal, conforme se ilustra na Figura 2.9 (Soroushian e Lee, 1990; Amin *et al.*, 2015).

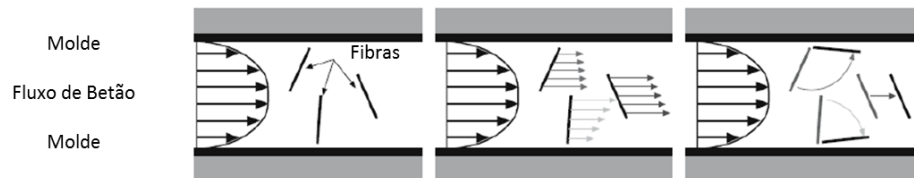


Figura 2.8: Influência do escoamento do betão na orientação das fibras, (Stähli *et al.*, 2008; Abrishambaf, 2015).

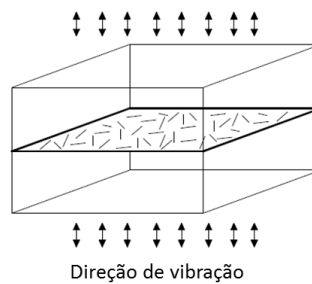


Figura 2.9: Influência da vibração na orientação das fibras, (Soroushian e Lee, 1990; Abrishambaf, 2015).

Por outro lado, o efeito parede, provocado pelo molde, deve também ser tido em conta, pois a superfície rígida do molde constitui uma barreira ao livre posicionamento da fibra na matriz.

É ainda de referir que os assentamentos diferenciais entre fibra e matriz, como resultado da disparidade nas suas densidades, podem levar à segregação ou à não uniformidade do reforço da matriz.

Por último, os agregados, particularmente os de maiores dimensões, constituem uma fronteira que impede a livre distribuição e orientação das fibras. Contudo, este fenómeno apenas é relevante para peças de pequenas dimensões.

É, por este motivo, interessante determinar o número de fibras que atravessa uma determinada secção de betão. Essa quantidade depende não apenas da dosagem de fibras, mas também do fator de orientação. Krenchel (1975) determinou que a quantidade de fibras que atravessa uma dada secção é, teoricamente, fornecida pela equação: (2.1)

$$n = \alpha \frac{V_f}{A_f} \quad (2.1)$$

onde n corresponde ao número de fibras por unidade de superfície, α é o fator de orientação, V_f é a fração volúmica de fibras (volume de fibras por unidade de volume do betão) e A_f é a área da secção transversal de uma fibra.

A explicação sobre o significado do fator de orientação pode ser encontrada no trabalho de Dupont (2003). De forma sumária, pode dizer-se que numa situação teórica em que todas as fibras estivessem alinhadas segundo a direção perpendicular à secção em estudo, o fator de orientação tomaria o valor 1. Se todas as fibras estivessem orientadas num plano perpendicular à secção (e com uma distribuição aleatória), o fator de orientação valeria $2/\pi$. Numa situação em que as fibras possuem uma distribuição aleatória tridimensional, esta fator vale 0.5.

O fator de orientação varia também com a proximidade das fibras às paredes do molde. Num molde com secção transversal retangular, podem ser distinguidas três zonas, conforme se representa na Figura 2.10. Nesta figura, as variáveis b e h são a largura e a altura da secção transversal, enquanto l_f representa o comprimento da fibra. A zona 1, afastada dos bordos, é aquela onde a fibra pode rodar livremente e, por isso, assumir qualquer orientação. Já na zona 2 deve ser considerada uma condição fronteira correspondente à proximidade a uma parede do molde. Finalmente, na zona 3, uma segunda condição de fronteira é adicionada, mas agora perpendicular à primeira condição de contorno. Esta zona corresponde, portanto, a um canto do molde.

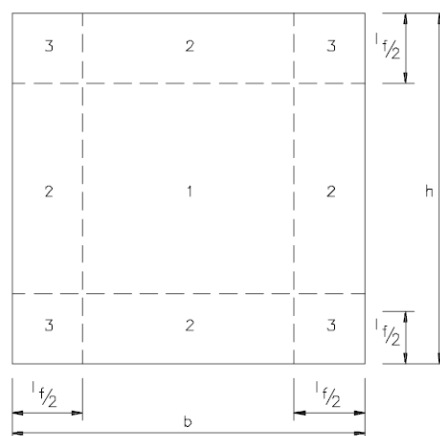


Figura 2.10: Secção transversal dividida nas diferentes zonas de orientação, (Dupont e Vandewalle, 2005)

Considere-se o caso em que a secção transversal representada na Figura 2.10 é a superfície de uma fissura, e se pretende avaliar o efeito das fibras que atravessam essa fissura, quando o esforço de tração aplicado é perpendicular à fissura. O fator de orientação é geralmente quantificado teoricamente, para cada uma das três zonas, considerando as seguintes premissas:

1. As fibras são lisas. Para fibras com gancho na extremidade pode ser tomado o mesmo fator de orientação, uma vez que o efeito dos ganchos é negligenciável para esta quantificação.
2. Se o betão fresco é vibrado durante um longo período de tempo ou quando tem uma alta compacidade, as fibras tendem a orientar-se num plano horizontal (Grünewald e Walraven, 2002; Dupont e Vandewalle, 2005). Este efeito de orientação depende muito da duração e da intensidade da vibração e também da compacidade e composição do betão sendo, por isso, muito

difícil quantificá-lo. No entanto, a partir de outras pesquisas (Barragán et al., 2000; Dupont e Vandewalle, 2005) conclui-se que a vibração não tem um efeito significativo sobre a orientação se a amostra é vibrada apenas por 1 ou 2 minutos e se a compacidade do betão fresco não for muito alta. O efeito da vibração na orientação das fibras não é considerado neste caso.

3. A localização da fibra na peça de BRFA é caracterizada pelo seu centro de gravidade. Cada ponto da seção transversal tem igual probabilidade de ser o centro de gravidade de uma fibra.
4. A orientação das fibras na zona 1 (Figura 2.10) não é influenciada pelas condições-fronteira. O fator de orientação nesta zona vale portanto 0.5.
5. A orientação das fibras na zona 2 (Figura 2.10) é apenas influenciada por um lado do molde
6. A orientação das fibras na área 3 (Figura 2.10) é influenciada por dois lados do molde.

Supõe-se que a superfície superior da secção tem a mesma condição de fronteira que os lados do molde. Após moldagem, esta superfície é regularizada de modo a não existirem fibras que se destacam. Aqui poderia haver um maior número de fibras na superfície devido à remoção e nivelamento da amostra. Este efeito não é considerado na quantificação dos fatores de orientação que aqui se apresenta.

Conhecendo os fatores de orientação das zonas 1, 2 e 3 é possível calcular um fator de orientação global, dado pela equação (2.2):

$$\alpha = \frac{[\alpha_1 (b - l_f)(h - l_f) + \alpha_2 [(b - l_f) l_f + (h - l_f)] l_f + \alpha_3 l_f^2]}{b h} \quad (2.2)$$

Fator orientação na zona 1

Conforme foi referido, nesta zona, em que as fibras apresentam uma distribuição aleatória tridimensional, o fator de orientação tem o valor 0.5. Explica-se a seguir o procedimento que permite chegar a este valor.

Uma fibra na zona 1 não está limitada por qualquer condição de fronteira e pode orientar-se livremente em torno do seu centro de gravidade. Se se considerar todas as orientações possíveis para a fibra, os pontos da sua extremidade descrevem a superfície de uma esfera, conforme indicado na Figura 2.11. Cada ponto na esfera tem igual probabilidade de ocorrência. Isto significa que a probabilidade de a fibra fazer um ângulo θ com o eixo longitudinal da peça, é proporcional à área dA :

$$dA = \frac{\pi l_f^2}{2} \sin \theta d\theta \quad (2.3)$$

A contribuição da área dA para o fator de orientação é dada por $\cos\theta dA$.

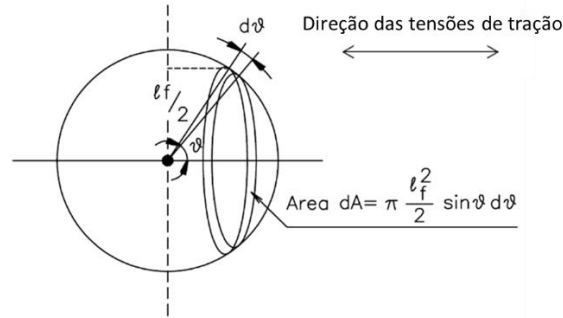


Figura 2.11: Determinação do fator de orientação para fibras na zona 1 (Dupont e Vandewalle, 2005).

O fator de orientação para a zona 1 é então dado pela seguinte equação, conforme explicam Dupont e Vandewalle (2005):

$$\alpha_1 = \frac{\int_0^{\pi/2} dA \cos\theta d\theta}{2\pi \left(\frac{l_f}{2}\right)^2} = 0.5 \quad (2.4)$$

Fator orientação de uma fibra sujeita a uma condição fronteira

Para esta situação, correspondente à zona 2, supõe-se que o centro de gravidade da fibra se encontra a uma distância do bordo $y < l_f/2$. Assim sendo, a fibra não consegue rodar livremente. Os pontos da extremidade da fibra descrevem, então, uma esfera cortada nos topos, conforme esquematizado na Figura 2.12.

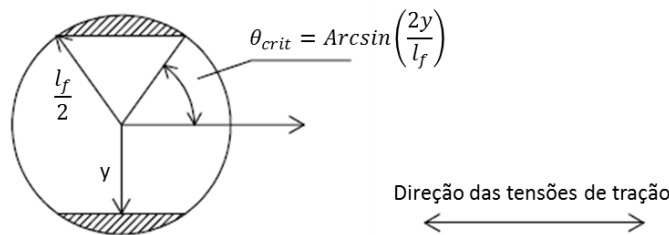


Figura 2.12: Fibra com uma condição fronteira.

Considerando novamente θ o ângulo que a fibra faz com o eixo longitudinal, a fibra não será afetada pela superfície do molde para:

$$\theta < \theta_{crit} = \arcsin\left(\frac{2y}{l_f}\right) \quad (2.5)$$

Desta forma, o fator de orientação para a zona 2, seguindo os pressupostos indicados atrás, tem um valor $\alpha_2=0.6$ (Dupont e Vandewalle, 2005).

Fator orientação para uma fibra sujeita a duas condições fronteira

Para a zona 3, considera-se que o centro geométrico da fibra se encontra a uma distância y de uma parede do molde e z da que lhe é perpendicular. Seguindo um raciocínio análogo ao que foi exposto para a zona 2, o fator de orientação toma, neste caso, um valor $\alpha_3=0.84$.

2.4.4. DOSAGEM DE FIBRAS

Segundo Dupont (2003), um aumento significativo da tenacidade do material requiere uma dosagem mínima de fibras que possibilite um reforço homogéneo do betão.

Caso não se verifique a uniformidade da sua distribuição, corre-se o risco de aparecimento de fendas em secções não reforçadas, não atravessadas por qualquer fibra. Contudo, deve ter-se também atenção ao limite superior para a dosagem de fibras, pois a sobredosagem prejudica a trabalhabilidade do betão.

Assim sendo, Vandewalle (2005) apresenta como limite máximo do espaçamento entre fibras, s , para assegurar um reforço homogéneo, o valor $0,45l_f$. Para se obter o valor correspondente da dosagem de fibras, V_f , pode recorrer-se à teoria de Mckee (Vandewalle, 2005) que relaciona esta dosagem com a variável s :

$$s = \sqrt[3]{\frac{\pi d_f^2 l_f}{4 V_f}} \quad (2.6)$$

3

ENSAIO DE *PULL-OUT* DE
UMA FIBRA

3.1. INTRODUÇÃO

A aderência da fibra à matriz, é um fator de grande relevância para o comportamento mecânico do compósito. Por um lado, esta ligação tem uma influência significativa, numa fase inicial, no controlo da micro fissuração garantido pelas fibras (Selvadurai, 1983; Mori e Mura, 1984; Stang e Shah, 1986; H. Stang, 1990). Ao mesmo tempo, quando se atingem fendas de maiores dimensões, o processo de arrancamento possibilita um incremento da energia absorvida após fissuração. É, por isso, essencial possuir uma descrição correta deste processo (Budiansky *et al.*, 1986; Jenq e Shah, 1986; Rossi *et al.*, 1986; Budiansky e Amazigo, 1989; H. Stang, 1990).

Deste modo, é muito pertinente prever o comportamento na interface fibra matriz, o que é geralmente conseguido através do ensaio de *pull-out*, de apenas uma (*single fibre pull-out test*) ou de várias fibras. O primeiro é de mais simples execução e apresenta uma precisão razoável (Abrishambaf, 2015). O termo *pull-out* significa arrancamento. Usa-se nesta dissertação a designação em Inglês por ser a correntemente utilizada.

Uma vez, que não se trata de um ensaio normalizado, pode apresentar múltiplas configurações. Alguns exemplos são apresentados na Figura 3.1.

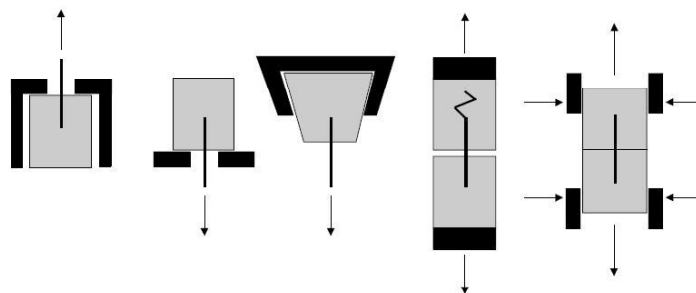


Figura 3.1: Exemplos de configurações do ensaio de pull-out, (Groth, 2000; Ferreira, 2008)

3.2. COMPORTAMENTO DE FIBRAS LISAS E FIBRAS COM GANCHO

De um modo geral, as componentes da ligação fibra/matriz podem ser classificadas como (Alwan *et al.*, 1999; Löfgren, 2005):

1. ligação física e/ou química entre fibra e matriz;
2. resistência por fricção;
3. componente mecânica (resultante de fibras com geometrias particulares, por exemplo, onduladas, torcidas ou com extremidades em gancho);
4. interligação de fibras.

O processo de arrancamento de fibras lisas envolve essencialmente dois mecanismos, a perda de ligação da fibra com a a envolvente, seguida de fricção provocada pelo seu escorregamento.

Löfgren (2005), explica o comportamento das fibras lisas (Figura 3.2), fazendo também uma comparação com as fibras com extremidade em gancho.

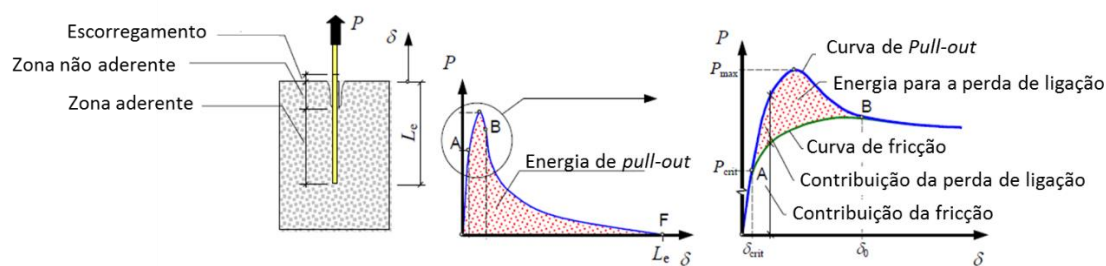


Figura 3.2: Comportamento ao *pull-out* de fibras lisas, adaptado de (Löfgren, 2005).

O ramo OA (onde O representa a origem) é associado ao comportamento elástico ou aderente. No ramo AB inicia-se a perda gradual de ligação entre os componentes do composto, até à desconexão total, que ocorre em B.

Em BF, a resistência oferecida provém apenas de mecanismos de fricção, e a carga resistida diminui com a progressão do escorregamento da fibra. A energia de pull-out, isto é, energia dissipada durante o arrancamento, é influenciada pelo comprimento de embebição da fibra uma vez que, quanto maior este for, maior será a contribuição da fase aderente.

As fibras com extremidade em gancho apresentam uma melhor performance, uma vez que a deformação mecânica da ancoragem lhes permite uma maior absorção de energia. A Figura 3.3 compara estas duas situações, arrancamento de fibras lisas traduzido pela curva verde e fibras com ancoragem em gancho a azul.

As fibras com extremidade em gancho apresentam um comportamento semelhante às fibras lisas no ramo OA e em grande parte do ramo AB. Porém, o facto de apresentarem uma amarração mecânica permite-lhes um aumento da carga suportada ao longo do ramo BC, que não se verifica nas fibras lisas. No ramo CD inicia-se o escorregamento da fibra, induzindo, desta forma, a deformação progressiva do

gancho (ramo DE). Quando se atinge o pico da deformação no gancho (ponto E), dá-se um decréscimo acentuado da resistência por fricção e o comportamento tende a aproximar-se ao de uma fibra lisa (ramo EF).

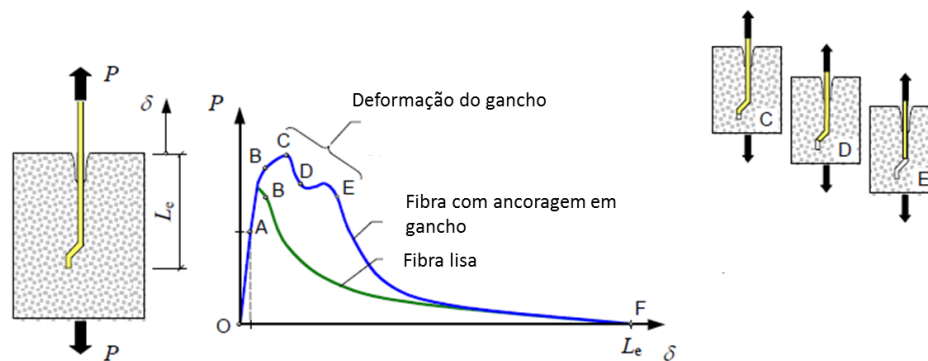


Figura 3.3: Comparação dos comportamentos de fibras lisas e fibras com extremidade em gancho, adaptado de (Löfgren, 2005)

3.3. EFEITO DA ORIENTAÇÃO E COMPRIMENTO DE EMBEBIMENTO DA FIBRA

No BRFA, as fibras apresentam, geralmente, uma distribuição aleatória. Deste modo, ainda que algumas possam estar orientadas na direcção das solicitações, a sua grande maioria forma um ângulo com a direcção das tensões aplicadas e com a orientação da fissura que atravessam. Nestes casos, as fibras estão sujeitas a uma combinação de solicitações de corte, flexão e tracção, (Bartos e Duris, 1994;Htut, 2010).

Uma vez que apresentam uma orientação tendencialmente aleatória, as fibras podem funcionar como ponte de tensões de fendas que não lhes sejam perpendiculares. Então, com o aumento da abertura de fenda, a fibra é puxada e, em consequência, forçada a orientar-se perpendicularmente ao plano da fenda. Este é um efeito designado de *snubbing*. Um esquema exemplificativo deste funcionamento é apresentado na Figura 3.4.

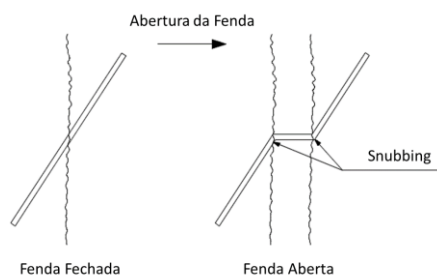


Figura 3.4: Efeito *snubbing*, adaptado de (Dupont, 2003).

O efeito de *snubbing* contribui para a melhoria significativa da ancoragem mecânica, sendo, por isso, necessária uma carga superior para o arrancamento da fibra (Lee e Foster, 2006). Ao mesmo tempo, geram-se esforços concentrados na zona em que a fibra é forçada a dobrar provocando, assim, destacamento do betão na sua vizinhança, designado de *spalling*, como é esquematizado na Figura 3.5.

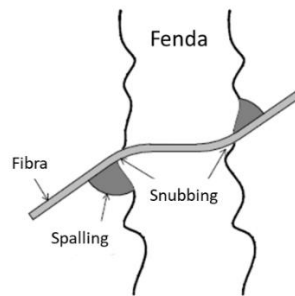


Figura 3.5: Efeitos de *snubbing* e *spalling*, adaptado de (Abrishambaf, 2015)

Com o destacamento do betão na vizinhança da fibra, esta dobra com maior facilidade, diminuindo assim as tensões por ela suportadas.

Por outro lado, o comprimento de embebedimento no betão, l_e , também tem influência no comportamento ao *pull-out*. Variações do valor de l_e implicam diferentes cargas de pico e modos de rotura do compósito uma vez que, quanto maior for o valor de l_e , maior a superfície de contacto da fibra com a matriz e, em consequência, maior a aderência.

O efeito das variações de ambos os parâmetros para o comportamento do BRFA foram estudados por Robins *et al.* (2002). Neste estudo foram realizados ensaios de *pull-out* em fibras com várias inclinações, comprimentos de embebedimento e para composições de betão de diferentes classes de resistência.

Na Figura 3.6 é avaliado o efeito da orientação da fibra no ensaio de *pull-out*.

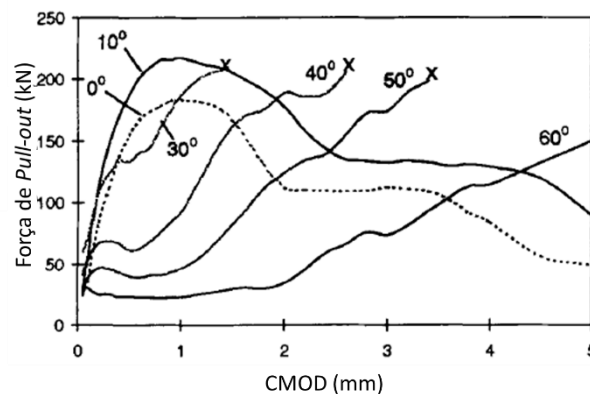


Figura 3.6: Influência da orientação em ensaios de *pull-out* de fibras com gancho, com $l_e=15\text{mm}$, adaptado de (Robins, Austin *et al.*, 2002)

Analisando as curvas dos ensaios realizados por Robins, Austin *et al.* (2002), apresentadas na Figura 3.6, é possível verificar que, para um dado valor da força de pull-out, o deslizamento da fibra aumenta para valores de orientação superiores. Inclinações maiores provocam momentos fletores no ponto de contacto fibra-betão, levando ao destacamento do betão. Uma maior quantidade de betão removida tornará mais fácil o deslizamento da fibra.

Pode também constatar-se que inclinações ligeiramente diferentes da vertical (situação correspondente à curva dos 10° de inclinação) são vantajosas, uma vez que conduzem a um ligeiro aumento da carga de pico, explicado pelo efeito de *snubbing*, sem que se dê a rotura da fibra. Contudo, como já foi referenciado anteriormente, o aumento do valor da inclinação acentua o destacamento do betão o que reduz os benefícios do efeito de *snubbing* (Figura 3.6), resultando num valor inferior da carga de pico, tal como acontece nas curvas correspondentes às restantes inclinações, 30°, 40°, 50° e 60°.

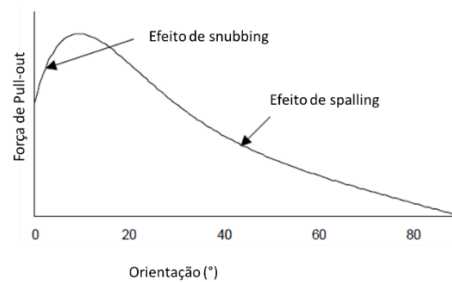


Figura 3.7: Efeito de *snubbing* versus efeito de *spalling*, adaptado de (Dupont, 2003)

Deve ainda salientar-se que, entre as inclinações 30° e 50°, neste estudo, houve rotura da fibra. Isto pode ser explicado pelo aumento do valor das tensões de flexão atuantes na fibra associadas ao efeito de *snubbing*.

Contudo, para a máxima orientação ensaiada, 60°, a fibra foi arrancada uma vez que, em situações em que a orientação é mais acentuada, o destacamento de betão é de tal forma elevado que a aderência é comprometida facilitando o arrancamento. Nestas situações existe uma maior dispersão de resultados, explicada pelo facto de a matriz ser heterogénea. Por exemplo, no caso de um agregado grosso estar mais próximo da fibra a secção apresentará maior resistência (Van Gysel, 2000).

É importante referir que a descrição anterior corresponde a um comportamento típico para fibras com gancho convencionais. A variação do tipo de fibra e do ripo de matriz cimentícia conduzirá a um comportamento diferente.

No trabalho de Robins et al. (2002), foi também abordado o efeito do comprimento de embebimento de fibras com gancho de extremidade no ensaio de pull-out (Figura 3.8).

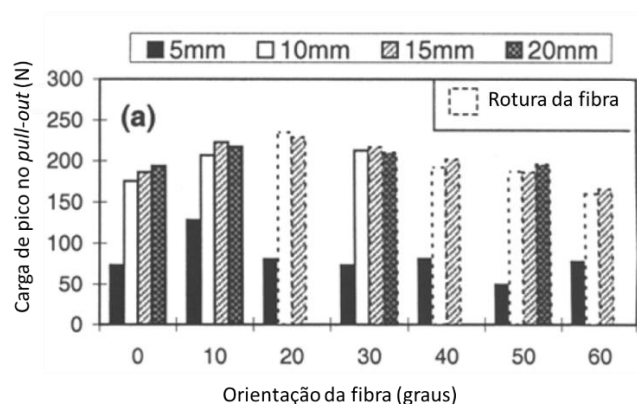


Figura 3.8: Influência do comprimento de embebimento no ensaio de *pull-out* de fibras sujeitas a várias inclinações, adaptado de (Robins, Austin et al., 2002)

Quando se avalia o aspeto de uma fratura em BRFA, considera-se geralmente que uma fibra foi efetiva quando, após a separação dos dois blocos que confrontam com a fratura a fibra apresenta o seu gancho endireitado (Dupont e Vandewalle, 2005). No seu estudo, Robins, Austin et al. (2002) concluíram que um requisito necessário para que a fibra seja efetiva é que pelo menos todo o gancho esteja embebido no betão.

No trabalho de Robins, Austin et al. (2002), obtiveram-se maiores valores de carga de pico com o aumento de l_e . Contudo, a partir de determinado comprimento, estas diferenças são ligeiras. Nas fibras com extremidade em gancho, a influência de l_e é menos sentida, uma vez que o mecanismo de reforço destas fibras é maioritariamente devido à deformação mecânica da ancoragem.

O modo de rotura é também condicionado por l_e , uma vez que para inclinações de 20°, 30°, 40°, 50° e 60°, neste estudo, a partir de um comprimento de embebedimento $l_e=10\text{mm}$, ocorreu rotura da fibra, explicado mais uma vez pelo incremento na adesão que dificulta o seu arrancamento.

3.4. EFEITO DO TIPO DE FIBRA E MATRIZ CIMENTÍCIA

O comportamento ao arrancamento de uma fibra depende do tipo de fibra e das características da matriz cimentícia. As características do fio de aço da fibra associados à geometria específica da ancoragem desempenham um papel fundamental.

Abdallah e Fan (2017) estudaram o efeito da variação destes parâmetros no comportamento em *pull-out*. Para isso, fizeram variar, neste ensaio, o tipo de fibra – Dramix® 3D, 4D e 5D – e a classe de resistência da matriz utilizada.

Foram realizados ensaios para diferentes composições de betão cujas variáveis foram a geometria do gancho de ancoragem e as características do aço das fibras usados. Na Figura 3.9 são apresentados os resultados obtidos nesse trabalho para duas das matrizes utilizadas, uma de resistência normal NSC (*normal strength concrete*), com uma resistência à compressão $f_c = 33\text{MPa}$ e outra de muito elevada resistência UHPM (*ultra high performance mortar*), $f_c = 148\text{MPa}$.

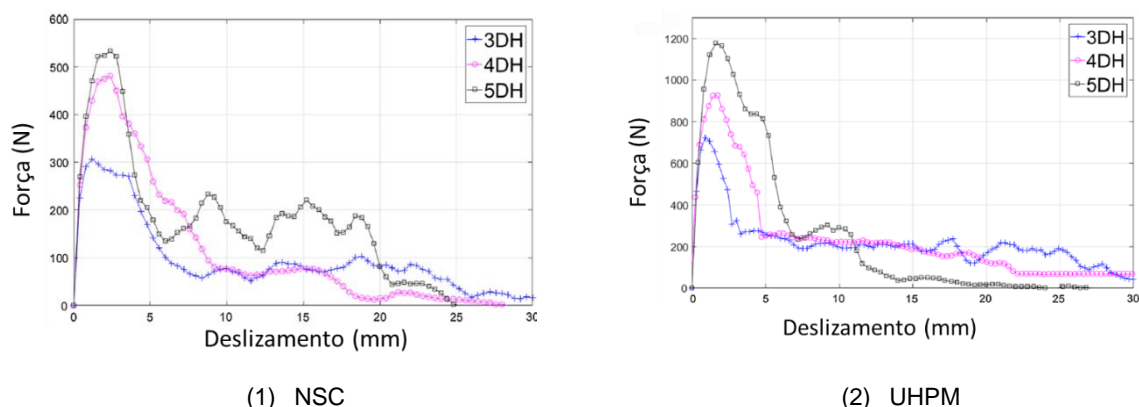


Figura 3.9: Curvas médias do ensaio de *pull-out* de fibras Dramix® 3D, 4D e 5D.

Relativamente à influência do tipo de fibra, a diferença de comportamentos é evidente.

Observando as curvas correspondentes às fibras 5D, Abdallah e Fan (2017) verificaram que a forma da curva da matriz NSC progride de forma diferente da obtida com a matriz UHPM. O declive inicial da

curva, numa fase inicial do ensaio, é semelhante para ambas as matrizes, no entanto no comportamento após força máxima a curva NSC exibe uma queda de carga mais acentuada do que a UHPM. Além disso, a força de arrancamento residual das fibras 5D, incorporadas em matrizes de mais baixa resistência, é notavelmente superior à observada na matriz de mais alta resistência. Essas diferenças podem ser atribuídas às irregularidades remanescentes no final da fibra, devido à incompleta deformação e alinhamento do gancho.

O comportamento das fibras 3D e 4D também varia consoante a matriz em que estas são incorporadas. Quando embebidas em UHPM, a curva resultante do ensaio apresenta uma queda abrupta após a carga máxima, que não se verifica quando se encontram na matriz NSC.

Na generalidade, também pode ser observado que a geometria do gancho de extremidade tem uma influência significativa no comportamento da fibra no *pull-out*. O elevado efeito de ancoragem proporcionado pelo gancho das fibras 4D e 5D, aumenta significativamente a resistência ao arrancamento, potenciando, deste modo, a força máxima obtida no ensaio. Não deve ser esquecido que as fibras 4D e 5D, para além de apresentarem uma diferente geometria do gancho, são fabricadas com aço de maior resistência e ductilidade. Este aspeto contribui também para o aumento da força de *pull-out* requerida para deformar o gancho.

No que diz respeito ao tipo de matriz cimentícia, a resposta face ao arrancamento depende da resistência que esta apresenta. A variabilidade de comportamento é maior no caso da fibra 5D do que nas fibras 3D e 4D.

Analisando a curva resultante do ensaio para ambas as matrizes, Abdallah e Fan (2017) concluíram que quando a fibra se encontra incorporada na matriz de maior resistência (UHPM), a carga máxima de *pull-out*, bem como a energia absorvida, traduzida pela área total compreendida abaixo da curva força-deslizamento aumenta. Esta diferença pode ser atribuída à variação na capacidade de deslizamento como resultado de diferentes mecanismos de arrancamento assim como aos diferentes níveis de deformação e alisamento do gancho.

As diferenças na deformação do gancho, obtidas para estes ensaios, são apresentadas na Figura 3.10.

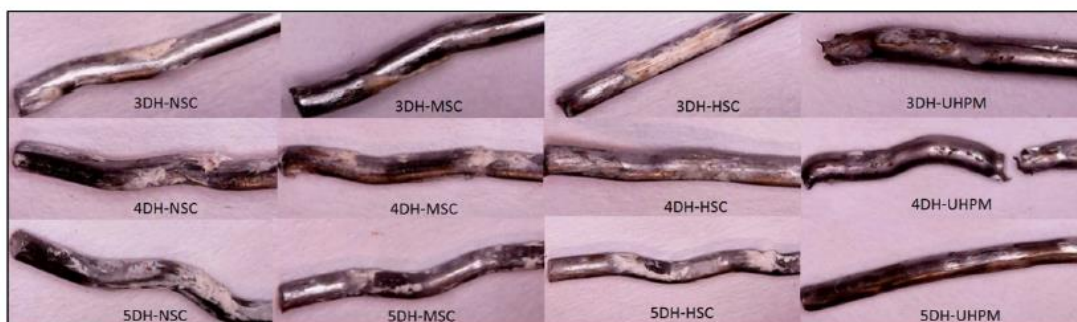


Figura 3.10: Deformação do gancho de ancoragem após *pull-out*, adaptado de Abdallah e Fan (2017).

Na Figura 3.10, além das composições de betão já mencionadas, são também apresentadas a MSC (*medium strength concrete*), com uma resistência à compressão $f_c = 52\text{MPa}$ e a HSC (*high strength concrete*), com $f_c = 71\text{MPa}$.

Da observação das deformações obtidas no trabalho de Abdallah e Fan (2017), é evidente a diferença de comportamentos. Nas fibras 3D, ocorre arrancamento sem a deformação completa do gancho apenas para as duas matrizes de resistência mais baixa. Para as duas restantes, a fibra é totalmente deformada ocorrendo também rotura do aço. Por oposição, as fibras 5D apenas exibem alisamento total do gancho para a UHSM, apresentando para as duas composições de resistências mais baixas sinais pouco visíveis de deformação do gancho. Finalmente, as fibras 4D apresentam um comportamento intermédio, tendo rompido apenas para a matriz de mais elevada resistência.

Conclui-se que o nível de deformação e alisamento do gancho é significativamente diferente dependendo da matriz de onde são arrancados.

4

**ENSAIO DE FLEXÃO DE PRISMAS
DE BRFA****4.1. INTRODUÇÃO**

A principal maior valia de um BRFA face ao betão simples está relacionada com o seu comportamento após a fissuração. No betão simples, a energia absorvida durante o processo de propagação de uma fissura é extremamente reduzida. Para valores baixos da extensão mecânica de tração desenvolvida no betão, as microfissuras coalescem dando origem a uma macrofissura e à consequente incapacidade para resistir a tensões de tração. No BRFA, pelo contrário, as fibras funcionam como ponte de tensões e asseguram uma importante capacidade de retenção de tensões de tração após a fissuração. É, por este motivo, importante conhecer o comportamento do BRFA após a fissuração. Este comportamento pode ser descrito através de uma relação tensão-extensão ($\sigma - \varepsilon$) ou de uma relação tensão-abertura de fenda ($\sigma - w$).

A avaliação experimental do comportamento do BRFA após fissuração pode ser feita através de um ensaio de tração uniaxial. Apesar de se tratar de um ensaio não normalizado, existem várias propostas para a sua configuração, entre as quais a apresentada pelo RILEM 162-TDF. Contudo, este ensaio é de elevada complexidade (Amin, Foster *et al.*, 2015). Por isso, a caracterização do comportamento do betão tracionado é usualmente efetuada de um modo indireto recorrendo a um ensaio de flexão em prismas (descrito no subcapítulo 4.2). Com base nos resultados deste ensaio é possível, através de uma análise inversa, estimar a relação $\sigma - w$ para o caso de tração uniaxial (subcapítulo 4.3).

4.2. ENSAIO DE FLEXÃO DE PRISMAS COM ENTALHE

Atualmente existem várias configurações possíveis para o ensaio de flexão de BRFA. De uma forma geral, o ensaio pode ser de três ou quatro pontos, isto é, dois pontos de apoio e um ponto de aplicação da carga, ou dois pontos de apoio e dois de aplicação da carga, respetivamente. O ensaio de três pontos é geralmente efetuado num provete com entalhe. É este o procedimento proposto pela norma europeia EN 14651:2005. Em seguida, descreve-se sumariamente o método de ensaio desta norma, que foi utilizado nesta dissertação.

O objetivo do ensaio é avaliar o comportamento à tração do BRFA, em termos de valores de resistência residual à tração por flexão, determinada a partir da relação força-CMOD (*crack mouth opening displacement*) ou da relação força-flecha. A força é aplicada a meio vão de um prisma com entalhe, simplesmente apoiado, sendo o ensaio conduzido com imposição de deformação.

O prisma deve apresentar uma secção transversal de 150mm × 150mm e o comprimento, L , pode variar entre 550mm < L < 700mm.

O entalhe deve ser realizado de acordo com o especificado na Figura 4.1. Não deve ter uma espessura superior a 5mm e a distância h_{sp} deve ser igual a $125 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

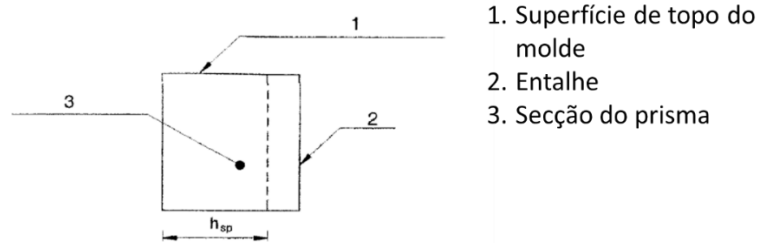


Figura 4.1: Posicionamento do entalhe no provete, adaptado da norma EN 14651: 2007

A monitorização da deformação do prisma pode ser efetuada medindo o valor de CMOD (procedimento seguido nesta dissertação), como se apresenta na Figura 4.2 ,ou medindo a flecha do prisma Figura 4.3.

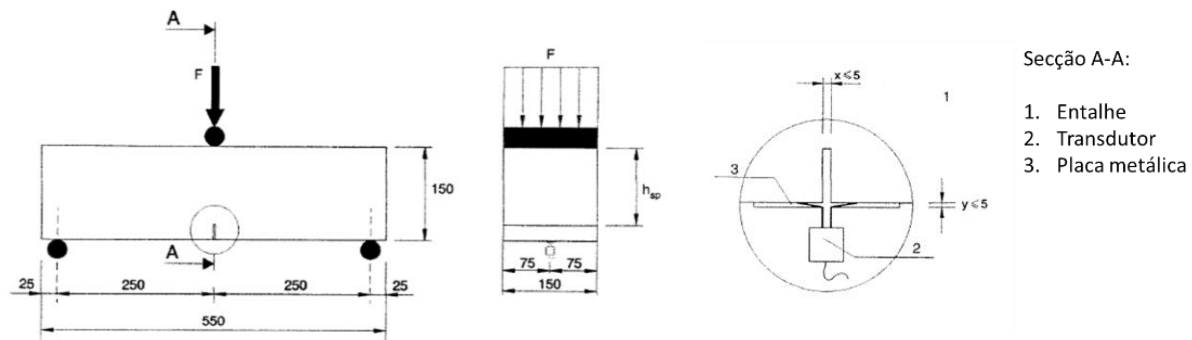


Figura 4.2: Configuração do ensaio de flexão com medição de CMOD, adaptado da norma EN 14651: 2007

Na medição de CMOD deve ser tido o cuidado de montar o transdutor a meio do eixo longitudinal, garantindo uma distância entre a base do provete e plano da medição, y , inferior ou igual a 5mm. Note-se que CMOD representa o valor da abertura da fenda medido para uma distância entre a base do provete e a linha de medição $y=0$. Caso o valor de y seja diferente de 0, então o valor de CMOD deve ser obtido através do valor medido, $CMOD_y$, usando a equação (4.1):

$$CMOD = CMOD_y \frac{h}{h + y} \quad (4.1)$$

sendo h a altura total do provete.

Se for monitorizada a flecha, a medição deve ser efetuada com referência ao eixo neutro (antes da fissuração) do prisma. O suporte onde é montado o transdutor deve ser rígido e fixado a meia altura do provete.

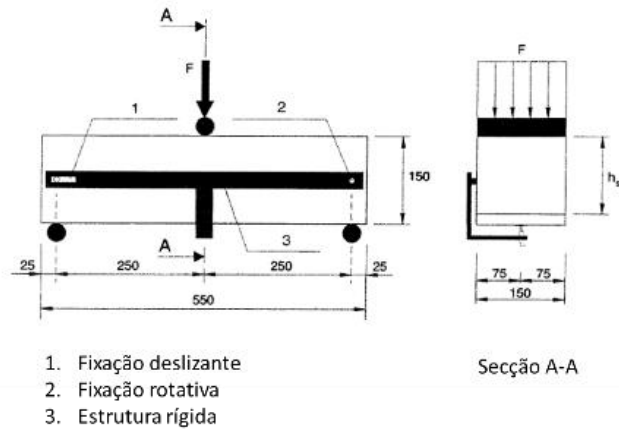


Figura 4.3: Configuração do ensaio de flexão com medição da flecha, adaptado da norma EN 14651: 2007

Existe uma relação entre o valor de CMOD e o valor da flecha (δ) que, de acordo com a norma EN 14651: 2007 é:

$$\delta = 0,85 \text{ CMOD} + 0,04 \quad (4.2)$$

com valores em mm. Assim, os resultados do ensaio podem ser expressos por uma curva força-CMOD ou força-flecha.

A força medida durante o ensaio é convertida em tensão. De acordo com a norma EN 14651: 2007, a tensão utilizada para expressar o resultado deste ensaio é a tensão calculada na secção de meio vão considerando uma distribuição linear elástica ao longo da altura h_{sp} . São considerados dois tipos de tensões, uma que caracteriza a tensão máxima de flexão atingida durante a fase “elástica”, e outro tipo, as tensões residuais de tração em flexão.

A tensão correspondente ao designado limite de proporcionalidade (LOP) é então dada por:

$$f_L = \frac{3 F_L l}{2 b h_{sp}^2} \quad (4.3)$$

onde l é o vão, b é a largura do provete, h_{sp} é a altura da secção acima do entalhe e F_L é a força correspondente ao LOP. Esta força é o valor máximo medido para uma abertura de fenda CMOD no intervalo de 0 mm a 0,05 mm (ver Figura 4.4). Atrás, esta tensão foi identificada como sendo uma característica da fase “elástica”, com esta palavra entre aspas porque, na realidade, a microfissuração na

secção de momento máximo inicia-se antes de ser atingida a força F_L (força no pico visível, por exemplo, no primeiro e quarto diagramas, a partir do lado esquerdo, na Figura 4.4).

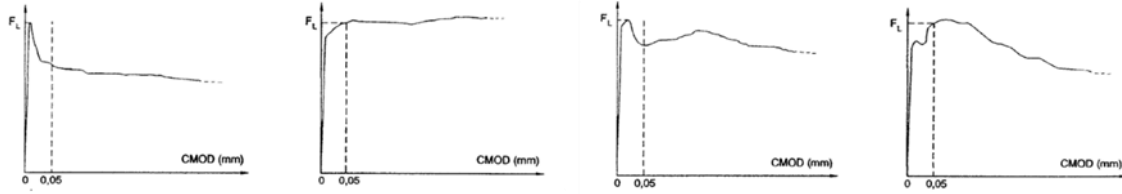


Figura 4.4: Modo de obtenção do valor F_L de acordo com a norma EN 14651: 2007

Para caracterizar os valores resistidos após a fissuração, usa-se a designada tensão residual de tração por flexão, $f_{R,j}$, onde j pode tomar os valores 1 a 4. São consideradas então 4 tensões residuais de tração em flexão. Estas tensões são determinadas do mesmo modo que a tensão f_L , mas, naturalmente, para diferentes valores de força. O valor da tensão residual de tração por flexão é dado pela equação (4.4):

$$f_{R,j} = \frac{3 F_j l}{2 b h_{sp}^2} \quad (4.4)$$

onde F_j é a força correspondente a um valor de CMOD pré-definido. Conforme se apresenta na Figura 4.5, as tensões $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$ são determinadas para valores CMOD de 0.5, 1.5, 2.5 e 3.5 mm, respetivamente.

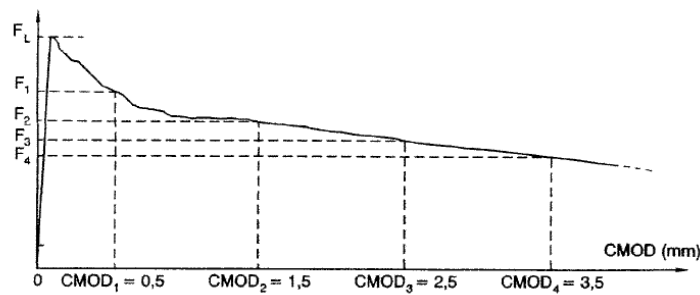


Figura 4.5: Diagrama carga-CMOD, EN 14651: 2007

As tensões residuais de tração em flexão são utilizadas em diversos métodos de dimensionamento de estruturas de BRFA em estado limite último de resistência e em estado limite de serviço. Nesses modelos, as tensões residuais de tração em flexão são afetadas por coeficientes redutores que permitem obter o contributo das fibras para a resistência a esforços de corte ou de flexão, por exemplo, em estruturas compostas por BRFA e armaduras ordinárias.

4.3. ESTIMATIVA DA RELAÇÃO σ - w RECORRENDO A UMA ANÁLISE INVERSA

Conforme foi exposto na introdução deste capítulo, é possível partir dos resultados de um ensaio de flexão em prismas de BRFA para obter uma estimativa da relação entre a abertura de uma fissura em BRFA e a tensão normal a essa fissura transferida através das fibras de aço (relação $\sigma - w$) para o caso de tração uniaxial. Esta é uma alternativa à realização de ensaios de tração direta, conforme se ilustra na Figura 4.6. Este processo é designado por análise inversa.

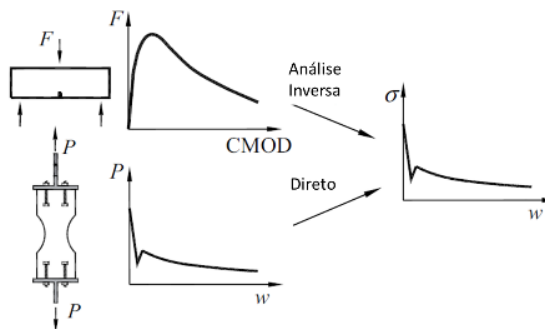


Figura 4.6: Utilização da análise inversa para obter uma estimativa do comportamento uniaxial do BRFA tracionado. Figura adaptada de Amin, Foster *et al.* (2015)

A análise inversa consiste em determinar o modelo constitutivo σ - w que conduz à resposta estrutural medida durante o ensaio (relação entre a força a meio vão e o valor de CMOD no prisma fletido). Esta análise é por vezes realizada recorrendo a modelos de elementos finitos com modelos de fissuração. Uma alternativa mais eficiente é a utilização de um modelo analítico de análise seccional. É este o procedimento sugerido pelo fib Model Code 2010 (fib 2013) e é o procedimento seguido nesta dissertação.

O processo de análise inversa com base num modelo de análise seccional é ilustrado na Figura 4.8. Neste modelo, faz-se uma subdivisão da secção de meio vão em camadas (neste trabalho foram consideradas 250 camadas). Considera-se uma distribuição linear de extensões ao longo da altura h_{sp} da secção. A relação entre a extensão de tração e a abertura de fissura é dada por $w = L_{cs} \varepsilon$. A variável L_{cs} é designada por comprimento característico, ao longo do qual se considera extensão constante. O valor adotado para este parâmetro tem pouca influência sobre o resultado final, conforme mostraram Kooiman e Walraven (2000). De acordo com a sugestão dos mesmos autores, considera-se neste trabalho $L_{cs} = h_{sp}/2$, sendo este o pressuposto adotado vulgarmente neste tipo de modelo. O comportamento de cada camada é regido por um modelo constitutivo (o mesmo para todas as camadas). Considera-se um comportamento linear-elástico para o betão comprimido e para o betão tracionado não fissurado. O comportamento do betão tracionado após a fissuração expressa a tensão como a soma do contributo do betão, $\sigma_c(w)$ (tensão transferida pelo betão, na fase de amolecimento, antes da formação de uma microfissura), e das fibras, $\sigma_f(w)$:

$$\sigma(w) = \sigma_c(w) + \sigma_f(w) \quad (4.5)$$

O contributo do betão é quantificado através do modelo proposto por Voo e Foster (2004) e usado, entre outros, por Amin et al. (2015):

$$\sigma_c(w) = c_1 f_{ct} e^{-c_2 w} \quad (4.6)$$

onde f_{ct} é a resistência à compressão do betão sem fibras, c_1 é um fator que permite ter em conta a contribuição das fibras para a resistência de pico da matriz (neste trabalho é-lhe atribuído o valor unitário). O fator c_2 controla a inclinação do ramo decrescente da curva e é afetado pelo volume de fibras e composição da matriz utilizadas. O seu valor é dado pela equação (4.7).

$$\begin{cases} c_2 = \frac{30}{1 + 100\rho_f}, & \text{para } a_g \leq 10 \text{ mm} \\ c_2 = \frac{20}{1 + 100\rho_f}, & \text{para } a_g > 10 \text{ mm} \end{cases} \quad (4.7)$$

onde a_g é a dimensão máxima do agregado.

Voo e Foster (2004) verificaram que existe algum desfasamento entre o início da fissuração e a ativação das fibras, que pode ser maior ou menor consoante a inclinação das fibras face ao plano da fenda. A ativação progressiva das fibras resulta num ramo de transição entre a fase não fissurada e a fase em que o reforço é dominado pelas fibras (ver Figura 4.7).

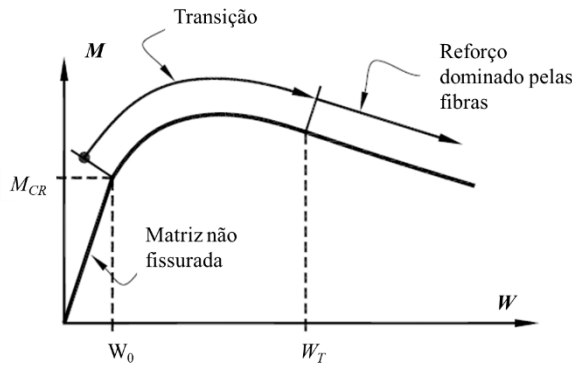


Figura 4.7: Proposta de Amin, Foster *et al.* (2015) para caracterizar, de um modo simplificado, a parte inicial da relação $\sigma_f(w)$

O contributo das fibras, para aberturas de fissura superiores a w_T , é quantificado através de uma função multilinear definida por pontos. Para aberturas de fissura inferiores, é considerado um ramo de concordância não-linear (que traduz a transição referida na Figura 4.7) dado pela função:

$$\zeta = \begin{cases} \left(1 - \frac{(w_T - w)^2}{w_T^a}\right)^b & \text{se } w < w_T \\ 1 & \text{se } w \geq w_T \end{cases}$$

Esta função é uma versão modificada do ramo de concordância proposto por Amin, Foster et al. (2015). A modificação consiste na introdução das variáveis a e b onde, na função original, surgiam as constantes 2 e 0,5, respetivamente. A introdução destas variáveis permite o ajuste da forma do ramo de concordância durante o processo de análise inversa.

A incógnita do processo de análise inversa é então a referida função $\sigma_f(w)$, definida por pontos e por um ramo de concordância. Esta incógnita é determinada iterativamente, através de um processo de tentativa e erro, até encontrar o modelo constitutivo $\sigma_f(w)$ que conduz a uma resposta estrutural F -CMOD comparável ao resultado experimental. Para cada uma destas iterações, o modelo de análise é resolvido calculando automaticamente a solução que satisfaz as equações de equilíbrio de forças axiais e de momentos indicadas na Figura 4.8, sendo neste caso nula a força axial total.

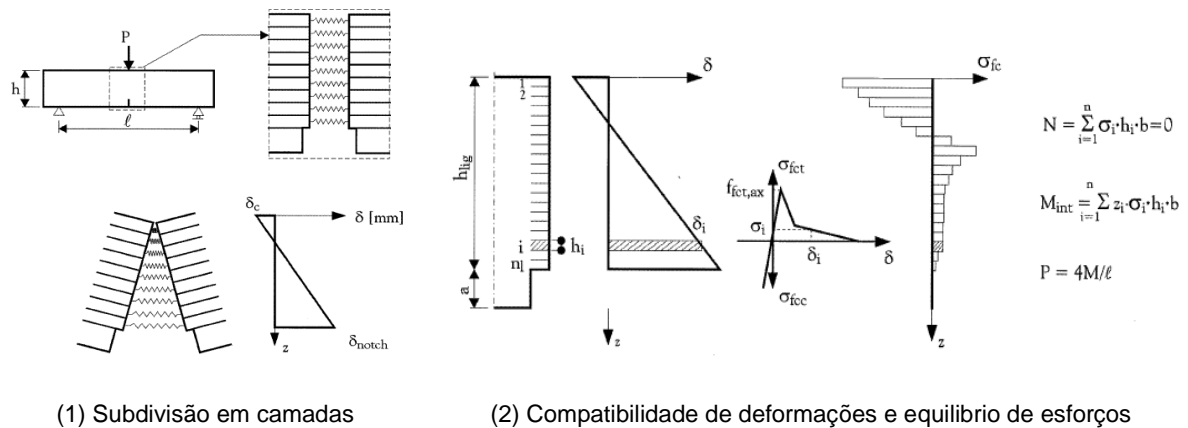


Figura 4.8: Ilustração do modelo de cálculo utilizado na análise inversa

5

CARACTERIZAÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL

5.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo, é feita a descrição do trabalho experimental realizado neste estudo. Apresentam-se as composições utilizadas e definem-se as características dos materiais que as compõe. Enumeram-se os ensaios realizados, e explicam-se os procedimentos utilizados para aqueles que não são normalizados, designadamente *pull-out* e análise de imagem.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA

Com o objetivo de avaliar o efeito da composição do betão e compreender o funcionamento das fibras Dramix® 4D e 5D, utilizaram-se três composições distintas. Foram atribuídas as denominações A-5D, A-4D e B-5D a essas composições. Para a A-5D e a A-4D, a matriz cimentícia adotada foi semelhante (matriz A), variando o tipo de fibra. Já na composição B-5D, a variante foi a matriz, tendo-se mantido as fibras 5D. Nas três composições, a dosagem de fibras de aço é 50kg/m³.

Nos provetes para ensaio de *pull-out*, utilizaram-se as respetivas três composições, mas sem adição de fibras, uma vez que, para este caso, foi feito o estudo do comportamento aderente de apenas uma fibra ao betão, sendo este comportamento avaliado em cilindros de reduzida dimensão.

Os constituintes utilizados em cada composição são apresentados na Tabela 5.1. A classificação dos agregados foi feita de acordo com a norma NP EN 12620:2002+A1:2010.

Tabela 5.1: Constituintes das várias composições de betão

| A-5D | A-4D | B-5D |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Fibras 5D | Fibras 4D | Fibras 5D |
| CEM I 42,5 R | CEM I 42,5 R | CEM I 42,5 R |
| Água | Água | Água |
| Adjuvante superplastificante | Adjuvante superplastificante | Adjuvante superplastificante |
| Areia natural 0/2 | Areia natural 0/2 | Areia natural 0/2 |
| Areia natural 0/4 | Areia natural 0/4 | Areia natural 0/4 |
| Brita 4/8 | Brita 4/8 | Brita 4/8 |
| Brita 6/14 | Brita 6/14 | |

As propriedades geométricas e mecânicas das fibras utilizadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Propriedades das fibras Dramix® 4D e 5D

| Fibra | Dramix® 4D 65/60 BG | Dramix® 5D 65/60 BG | |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|
| Propriedades do material | Resistência à tração (Rm_{nom}) | 1500 N/mm² | 2300 N/mm² |
| | Módulo de Elasticidade (E) | 210 GPa | 210 GPa |
| | Extensão na força máxima | (ver Figura 2.6) | (ver Figura 2.6) |
| Propriedades geométricas | Comprimento (l_f) | 60 mm | 60 mm |
| | Diâmetro (d_f) | 0.9 mm | 0.9 mm |
| | Esbelteza (l_f/d_f) | 65 | 65 |
| | Gancho | 4D | 5D |

Cada fibra apresenta uma referência onde é identificado o seu tipo de gancho, esbelteza e comprimento. Além disso, é especificado o acabamento utilizado (brilhante, B, galvanizado, G ou inoxidável, S) e o modo como as fibras são aglomeradas (coladas, G, soltas, L ou cintadas, C). Usando-se como exemplo as fibras Dramix® 4D 65/60 BG, estas apresentam ganchos do tipo 4D, esbelteza com o valor 65, um comprimento de 60 mm, um acabamento brilhante e são aglomeradas por colagem.

Relativamente à dosagem de fibras a utilizar, a proposta de Mckee, referenciada no capítulo 2, impõe um limite mínimo, que garanta um espaçamento máximo entre fibras de $0,45l_f$ (comprimento da fibra). Para as fibras utilizadas neste trabalho, a dosagem mínima de acordo com esta proposta é então de 15,22

kg/m³. A dosagem de fibras utilizada neste trabalho é então bastante superior ao mínimo proposto por Mckee.

Na produção do betão utilizou-se uma betoneira de eixo vertical. A compactação foi realizada por vibração externa, tendo-se utilizado uma mesa vibratória. Note-se que não deve ser utilizado um vibrador de agulha na compactação de BRFA, pela interferência que isso induziria sobre a distribuição das fibras.

Foi efetuada a cura húmida dos vários provetes de betão. Os ensaios foram realizados para idades dos provetes de 28±2 dias.

5.2. PLANO DE ENSAIOS

Com vista a melhor compreender os fatores que influenciam o comportamento do BRFA, além dos ensaios de caracterização do betão endurecido foram realizados ensaios de *pull-out*. Nestes últimos, fez-se variar a inclinação da fibra, isto é, o ângulo entre a fibra e a direção normal à superfície de betão, designado por θ . Consideraram-se os seguintes valores de θ : 0°, 30° ou 60°. Consideraram-se também diferentes valores para o comprimento de embebimento da fibra no betão, adotando-se um quarto do comprimento total da fibra (15mm) ou metade (30mm).

Fez-se ainda uma análise de imagem, nas secções dos prismas ensaiados à tração por flexão, para que se obtivesse uma melhor perceção da distribuição e orientação das fibras no betão.

A Tabela 5.3 indica o número de provetes ensaiados, para os diferentes tipos de ensaio e composições de betão. Nesta tabela, $f_{c,cubo}$ representa a resistência à compressão em provetes cúbicos, $f_{c,cilindro}$ representa a resistência à compressão em provetes cilíndricos, E representa o módulo de elasticidade e f_{ct} representa a resistência à tração direta do betão simples através de ensaios de tração direta.

Tabela 5.3: Tabela resumo dos ensaios realizados.

| Matriz | Fibras | f _{c,cubo} | f _{c,cilindro} | E | f _{ct} | Flexão | | Pull-out | | | | | | Análise de Imagem |
|--------|--------|---------------------|-------------------------|---|-----------------|----------------------|----------------------|----------|-----|----------------------|-----|-----|----|-------------------------|
| | | | | | | EN 14651: 2007 | L _e =15mm | | | L _e =30mm | | | | |
| | | | | | | | 0° | 30° | 60° | 0° | 30° | 60° | | |
| A | 4D | 6 | - | - | - | 6 | 6 | 6 | 6 | - | - | - | - | |
| | 5D | 3 | 3 | 3 | 3 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6+3 | 6+3 | 6+3 | 24 | |
| B | 5D | 3 | - | - | 3 | 9 | 6 | 6 | 6 | - | - | - | 36 | |

5.2.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO ENDURECIDO

A caracterização do betão foi feita aos 28±2 dias de idade. Os ensaios efetuados bem como as normas de ensaio utilizadas são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Ensaios de caracterização do betão endurecido.

| Ensaios de caracterização do betão | Norma | Idade (dias) |
|------------------------------------|-----------------------|--------------|
| Compressão (cubo) | NP EN 12390-3:2011 | 28 |
| Compressão (cilindro) | NP EN 12390-3:2011 | 28 |
| Módulo de elasticidade | DIN 1048-5:1991 | 28 |
| Tração direta | RILEM CPC7:1975 | 28 |
| Tração por flexão | EN 14651:2005+A1:2007 | 28 |

Relativamente ao ensaio de flexão, adotou-se a configuração de ensaio da norma EN 14651:2005+A1:2007, medindo o valor de CMOD. A progressão do ensaio (isto é, a velocidade de imposição da deformação) é controlada recorrendo a uma flecha medida por um transdutor de deslocamento do tipo LVDT.

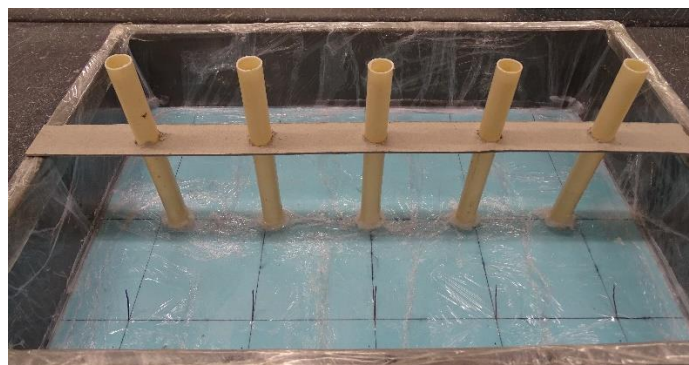
5.2.2. ENSAIO DE *PULL-OUT*

Fabrico dos provetes

No ensaio de *pull-out* foram utilizados provetes de geometria cilíndrica, com diâmetro e altura igual a 70 mm, apresentando (ao centro de uma das bases) uma fibra parcialmente embebida (comprimento de embebimento igual a 15 ou 30 mm), com inclinações de 0° 30° ou 60° relativamente à direção normal a essa base do cilindro. No seu fabrico, recorreu-se a dois formatos distintos para o molde. Um de produção individual, e outro agrupando vários provetes num bloco, do qual foram retiradas 9 carotes, centradas com cada fibra, após o endurecimento do betão. Cada carote corresponde a um provete para ensaio. Na Figura 5.1, são apresentados os dois modelos utilizados.



(a) molde individual



(b) molde agrupando vários provetes

Figura 5.1: Moldes utilizados na preparação dos provetes para ensaios de *pull out*

No molde apresentado na Figura 5.1(a), uma placa de poliestireno extrudido (XPS), funciona como base e como suporte de fixação da fibra, nas várias inclinações, deixando um comprimento de fibra no exterior da placa correspondente ao comprimento de embebedimento no betão. Um tubo de PVC, com diâmetro interno de 70 mm, materializa as paredes do molde.

Já o modelo apresentado na Figura 5.1(b) consiste numa caixa, com dimensão (570x365x70 mm³), em que uma placa de XPS na sua base serve igualmente como suporte de fixação para as fibras. Os tubos amarelos com 20 mm de diâmetro serviram para formar negativos, para passagem de elementos de fixação mecânica necessários para a operação de carotagem. Para garantir a resistência do betão na vizinhança da fibra, a carotagem foi feita 24 dias após a betonagem, com o cuidado de posicionar a carotadora garantindo que a fibra se encontrava centrada na sua secção.

Configuração do ensaio

Como já foi referido anteriormente, o ensaio de *pull-out* não é normalizado, possibilitando o uso de diversas configurações. Na presente dissertação, foi adotado o esquema do ensaio apresentado na Figura 5.2.

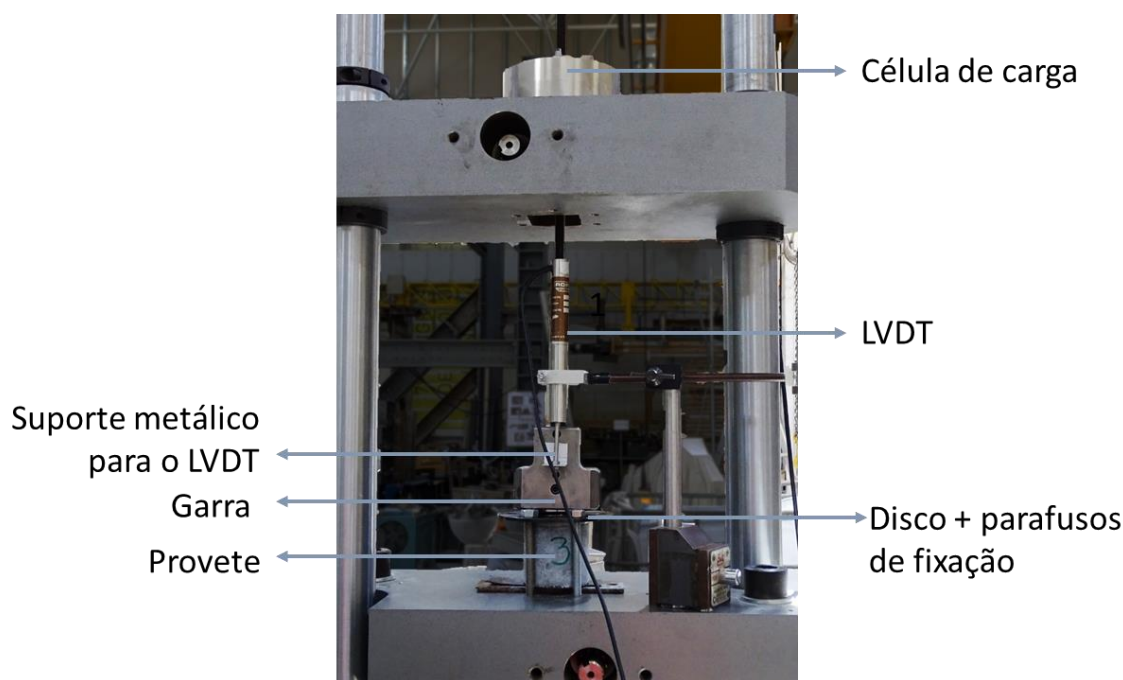


Figura 5.2: Configuração utilizada para o ensaio de *pull-out*.

Para a execução do ensaio é necessário que o provete seja imobilizado. Uma fibra, presa numa garra, é solicitada por esforços de tração direta, conduzindo ao seu arrancamento ou rotura.

Imobilizou-se o provete de betão através de um disco metálico fixo por parafusos à máquina de ensaio (Figura 5.2). As medições da carga e do deslocamento foram feitas através de uma célula de carga e de um LVDT, respetivamente. O deslocamento é medido com referência à garra, tendo-lhe sido fixado um suporte metálico ao qual o LVDT é ligado (Figura 5.2).

Para fixar as fibras com inclinações de 30° e 60° , foi necessário dobrar a sua extremidade não embebida, antes do ensaio, até esta atingir uma orientação vertical (isto é, perpendicular à base do cilindro).

A progressão do ensaio foi feita com controlo do deslocamento

As fibras com l_e de 15 mm foram ensaiadas em duas etapas de diferente velocidade, conforme indicado na Tabela 5.5. Nas fibras com l_e de 30 mm, a subdivisão foi em três etapas, como indicado na Tabela 5.6.

Tabela 5.5: Velocidades adotadas no ensaio de *pull-out* para $l_e=15$ mm.

| Deslocamento (mm) | Velocidade (mm/min) |
|-------------------|---------------------|
| 0-2 | 0,3 |
| 2-15 | 1,8 |

Tabela 5.6: Velocidades adotadas no ensaio de *pull-out* para $l_e=30$ mm.

| Deslocamento (mm) | Velocidade (mm/min) |
|-------------------|---------------------|
| 0-2 | 0,3 |
| 2-4 | 1,8 |
| 4-30 | 3,6 |

O ensaio termina após o arrancamento total da fibra, ou após a sua rotura quando isso acontece.

5.2.3. ANÁLISE DE IMAGEM

A análise de imagem permite quantificar o número e a orientação das fibras que atravessam uma secção de uma peça de betão.

Neste método, a orientação é calculada através da razão entre o maior e menor diâmetro da elipse que constitui a secção de corte da fibra.

A análise de imagem foi realizada nos prismas, após estes terem sido sujeitos ao ensaio de flexão. As superfícies (também designadas nesta dissertação por faces) sujeitas a análise de imagem resultaram do corte do prisma em duas secções distintas. Cada corte permitiu a análise de duas superfícies, perfazendo um total de quatro superfícies analisadas por prisma (Figura 5.3).

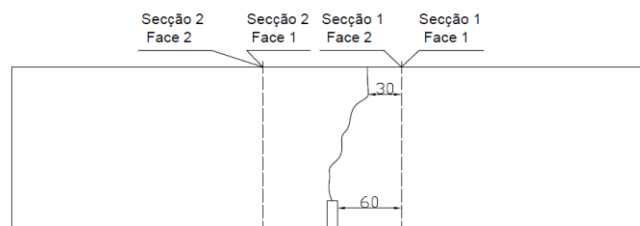


Figura 5.3: Obtenção das faces para análise de imagem.

A localização da secção de corte obedeceu a dois critérios (Figura 5.3):

- a) Um mínimo de 6 cm de afastamento da secção do entalhe;
- b) Um mínimo de 3 cm de afastamento até à fenda mais próxima (note-se que, especialmente nos prismas com fibras 5D, a fenda que determina a rotura do prisma tem uma geometria que se afasta significativamente de um plano perfeito).

Deste modo, assegurou-se que nenhuma das superfícies sujeitas a análise de imagem possua vazios que originalmente eram ocupados por fibras que poderiam ter sido arrancadas durante o ensaio de flexão.

Uma vez que as fibras e o betão apresentam tonalidades muito semelhantes, foi necessário aumentar o contraste entre os dois materiais. A técnica utilizada consistiu na aplicação de solução de fenolftaleína na face a fotografar. Assim, uma vez que nesta fase o teor de carbonatação do betão era praticamente inexistente, a sua cor alterou-se para púrpura, o que permitiu o contraste com a fibra, que se manteve na sua cor original. Seguidamente, as várias faces foram fotografadas obtendo-se um resultado do tipo que se ilustra na Figura 5.4(1).

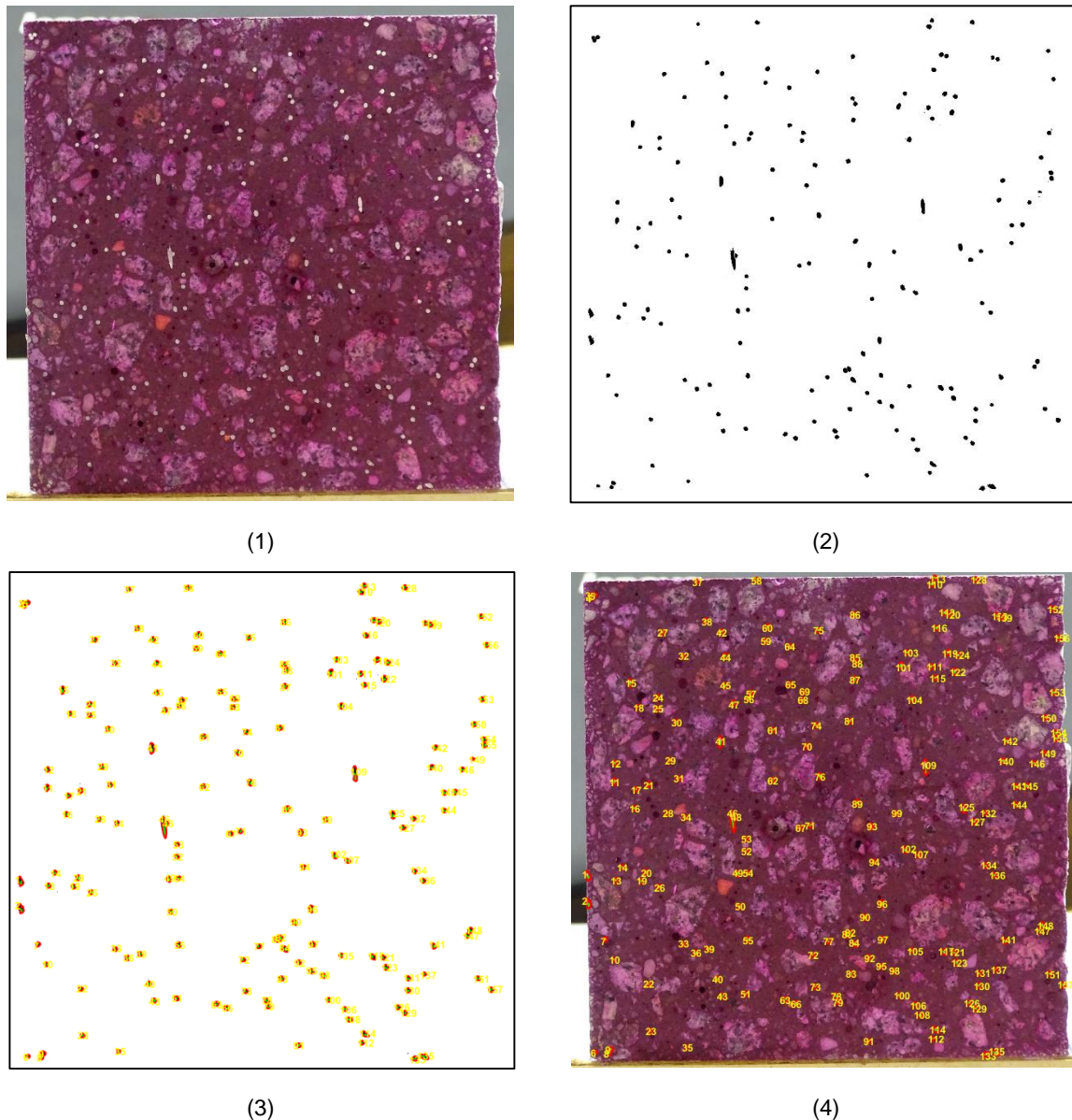


Figura 5.4: Etapas da análise de imagem.

As fotografias foram trabalhadas através do software de tratamento de imagem “image J”, alterando a cor das fibras para preto sobre fundo branco (Figura 5.4). Este programa permitiu que, em situações onde as fibras se encontravam muito próximas, estas fossem reconhecidas separadamente.

Seguidamente, foi feita a contagem do número de fibras e respetivas inclinações através de um software em linguagem Matlab desenvolvido na FEUP, no grupo de investigação CONSTRUCT-LABEST. Neste software são submetidos como dados: a fotografia após tratamento em “image J”; a área da secção de uma fibra; a área máxima possível para a secção de corte da fibra; e a correspondência da dimensão de um pixel na fotografia para a escala real em mm. Após processamento, o programa devolve uma imagem semelhante à da Figura 5.4(3), onde as circunferências a vermelho correspondem ao perímetro da fibra detetada.

Por fim, com o objetivo de se fazer uma análise visual dos resultados (para despistar eventuais falhas), sobrepôs-se o resultado obtido na Figura 5.4(3) na fotografia inicial (Figura 5.4(4)). Assim, tornou-se mais simples a verificação dos resultados.

6

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios.

No subcapítulo 6.2. apresentam-se os valores obtidos nos ensaios de compressão, tração, flexão e módulo de elasticidade. Apresentam-se os resultados individuais para cada provete, bem como a média de valores correspondente a cada composição. Finalmente, os valores médios são agrupados numa tabela de síntese para simplificar a comparação entre resultados obtidos para diferentes composições.

Os valores obtidos nos ensaios de *Pull-out* e análise de imagem encontram-se no subcapítulo 6.3. Nesse subcapítulo são também mencionados os resultados dos ensaios de tração por flexão, atendendo à relação entre estes tipos de ensaios. Os resultados para os vários ensaios são agrupados de acordo com as respetivas composições de betão. Em primeiro lugar, são apresentadas as curvas correspondentes aos ensaios de flexão, seguidas das curvas resultantes dos ensaios de *pull-out* e finalmente os valores obtidos através da análise de imagem.

6.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO ENDURECIDO

6.2.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Foram realizados ensaios de compressão, aos 28 dias de idade, em cubos e em cilindros, segundo a norma NP EN 12390-3:2011. Foram utilizados cubos com dimensões (150x150x150 mm³) e cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

O ensaio com provetes cilíndricos foi realizado apenas para o Betão A-5D.

A Tabela 6.1 apresenta os valores obtidos no ensaio de compressão em cubos. Nomeadamente, resistência à compressão em cubos, $f_{c,cubo}$ e o seu valor médio, $f_{cm,cubo}$. A tabela 6.2 apresenta os resultados obtidos em provetes cilíndricos, onde $f_{c,cilindro}$ é a resistência à compressão em cilindros e $f_{cm,cilindro}$ é o seu valor médio.

Tabela 6.1: Resultados do ensaio de compressão em cubos, aos 28 dias de idade

| Composição | Provete | Massa volúmica (kg/m ³) | $f_{c,cubo}$ (MPa) | $f_{cm,cubo}$ (MPa) |
|------------|---------|-------------------------------------|--------------------|---------------------|
| A-5D | A-5D-1 | 2450 | 95,6 | 96,0 |
| | A-5D-2 | 2470 | 96,4 | |
| A-4D | A-4D-1 | 2440 | 93,2 | 93,2 |
| | A-4D-2 | 2450 | 93,2 | |
| B-5D | B-5D-1 | 2410 | 77,0 | 78,7 |
| | B-5D-2 | 2410 | 79,3 | |
| | B-5D-3 | 2420 | 79,8 | |

Tabela 6.2: Resultados do ensaio de compressão em cilindros, aos 28 dias de idade

| Composição | Provete | Massa volúmica (kg/m ³) | $f_{c,cilindro}$ (MPa) | $f_{cm,cilindro}$ (MPa) |
|------------|---------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| A-5D | A-5D-1 | 2470 | 89,0 | 90,4 |
| | A-5D-2 | 2460 | 92,1 | |
| | A-5D-3 | 2480 | 89,9 | |

6.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade foi obtido apenas para o betão A-5D, tendo sido ensaiados 3 provetes. O ensaio foi realizado aos 28 dias de idade segundo a norma alemã, DIN 1048-5:199, em provetes cilíndricos com diâmetro de 150 mm e 300 mm de altura. Os resultados são indicados na Tabela 6.3, onde E é o módulo de elasticidade e E_m é o correspondente valor médio.

Tabela 6.3: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade, aos 28 dias de idade

| Composição | Provete | Massa volúmica (kg/m ³) | E (GPa) | E_m (GPa) |
|------------|---------|-------------------------------------|-----------|-------------|
| A-5D | A-5D-1 | 2450 | 41,0 | 41,5 |
| | A-5D-2 | 2440 | 41,2 | |
| | A-5D-3 | 2460 | 42,2 | |

6.2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO DIRETA

O valor da tensão de rotura por tração direta foi obtido seguindo a recomendação do RILEM CPC7:1975. O princípio do ensaio consiste em submeter o provete, de forma cilíndrica ou prismática (com secção quadrangular), a esforços de tração direta uniformemente distribuídos na secção, através de placas metálicas às quais o provete é colado.

Foram ensaiados 3 provetes cilíndricos para a composição A-5D e 3 para a B-5D, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. O ensaio apenas é considerado válido quando a fenda de rotura se encontra fora de ligação às placas metálicas, isto é, nos três quartos centrais da altura do provete.

A Tabela 6.4 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração direta.

Tabela 6.4: Resultados do ensaio de tração direta em cilindros, aos 28 dias de idade

| Composição | Provete | f_t (MPa) | $f_{t,m}$ (MPa) |
|------------|---------|----------------|--------------------|
| A-5D | A-5D-1 | 4,82 | 4,74 |
| | A-5D- | 4,66 | |
| | A-5D-3 | Inválido | |
| B-5D | B-5D-1 | Inválido | 4,14 |
| | B-5D-2 | Inválido | |
| | B-5D-3 | 4,14 | |

Os resultados do ensaio para os provetes A-5D-3, B-5D-1 E B5D-2, foram inválidos uma vez que, a secção de rotura correspondeu à extremidade de colagem, não cumprido desta forma os requisitos de validade.

6.2.4 ENSAIO DE TRAÇÃO FOR FLEXÃO

O ensaio de flexão foi feito segundo a norma EN 14651:2007, já mencionada no capítulo 4. Foram ensaiados 6 prismas para a composição A-5D, 6 para a composição A-4D e 9 para a B-5D, todos eles com dimensão, 150x150x600 mm³. Os resultados são sintetizados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Resultados do ensaio de flexão em prismas, aos 28 dias de idade

| Composição | Proвете | f_L (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) |
|------------|--------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| A-5D | A-5D-1 | 7.34 | 8.04 | 9.50 | 8.89 | 8.38 |
| | A-5D-2 | 8.32 | 9.97 | 12.48 | 11.62 | 9.02 |
| | A-5D-3 | 7.68 | 10.97 | 12.20 | 12.27 | 11.76 |
| | A-5D-4 | 7.78 | 8.61 | 11.71 | 12.25 | 6.74 |
| | A-5D-5 | 6.82 | 6.30 | 9.40 | 7.80 | 7.29 |
| | A-5D-6 | | | | | |
| | Média | 7.59 | 9.17 | 11.20 | 10.86 | 9.13 |
| A-4D | A-4D-1 | 6.78 | 4.42 | 5.05 | 3.50 | 2.54 |
| | A-4D-2 | 7.14 | 3.45 | 3.86 | 2.45 | 1.68 |
| | A-4D-3 | 7.61 | 5.99 | 6.69 | 3.54 | 2.38 |
| | A-4D-4 | 7.19 | 5.27 | 5.97 | 4.73 | 3.32 |
| | A-4D-5 | 6.56 | 3.87 | 4.61 | 3.63 | 2.92 |
| | A-4D-6 | 6.56 | 4.24 | 5.08 | 2.79 | 1.69 |
| | Média | 6.97 | 4.54 | 5.21 | 3.44 | 2.42 |
| B-5D | B-5D-1 | | | | | |
| | B-5D-2 | 6.51 | 5.63 | 7.84 | 8.60 | 7.74 |
| | B-5D-3 | 6.25 | 5.68 | 7.77 | 8.76 | 7.96 |
| | B-5D-4 | 7.58 | 9.72 | 13.48 | 10.25 | 9.28 |
| | B-5D-5 | 7.31 | 10.48 | 10.10 | 10.03 | 9.65 |
| | B-5D-6 | 7.23 | 8.24 | 12.48 | 10.09 | 9.69 |
| | B-5D-7 | 7.30 | 8.77 | 11.56 | 11.68 | 11.15 |
| | B-5D-8 | 7.13 | 10.16 | 11.94 | 12.44 | 11.08 |
| | B-5D-9 | 7.15 | 8.79 | 12.20 | 10.78 | 9.24 |
| | Média | 7.06 | 8.51 | 11.15 | 10.47 | 9.67 |

Os resultados para os provetes A-5D-6 e B-5D-1, não foram apresentados uma vez que, após análise da curva relativa ao ensaio, concluiu-se que o comportamento do provete na fase elástica tinha sido comprometido, o que pode ser explicado por possível microfissuração existente previamente ao ensaio. Por este motivo, excluíram-se estes valores da dissertação.

6.2.5. SÍNTESE

A Tabela 6.6 apresenta os valores médios obtidos nos ensaios referidos atrás, para cada composição.

Tabela 6.6: Síntese de resultados obtidos nos ensaios de caracterização, aos 28 dias de idade.

| Composição | $f_{cm, \text{cubo}}$ (MPa) | $f_{cm, \text{cilindro}}$ (MPa) | E_m (GPa) | f_t (MPa) | f_L (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) |
|------------|--------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| A-5D | 96,0 | 90,4 | 41,5 | 7,59 | 7,59 | 9,17 | 11,2 | 10,86 | 9,13 |
| A-4D | 93,2 | | | 6,97 | 6,97 | 4,54 | 5,21 | 3,44 | 2,42 |
| B-5D | 78,7 | | | 7,06 | 7,06 | 8,51 | 11,15 | 10,47 | 9,67 |

A tabela síntese mostra que neste estudo foram utilizados dois tipos de matriz cimentícia com classes de resistência distintas, sendo a matriz A a de maior resistência. Confrontando as resistências à compressão com as tensões residuais resultantes do ensaio de flexão, verifica-se que a classe de resistência do betão tem uma maior influência no comportamento do BRFA para valores de CMOD mais baixos.

Contudo, o parâmetro mais condicionante para o comportamento no ensaio de flexão é o tipo de fibra utilizado, o que se pode constatar analisando os valores de tensão residual obtidos para as composições A-5D e A-4D.

Estes aspetos são discutidos com maior detalhe no capítulo de análise de resultados.

6.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS COMPLEMENTARES

6.3.1. BETÃO A-5D

6.3.1.1. Ensaio de flexão

Para a composição A-5D foram ensaiados 6 prismas. As curvas correspondentes aos respectivos ensaios são apresentadas no gráfico da Figura 6.1.

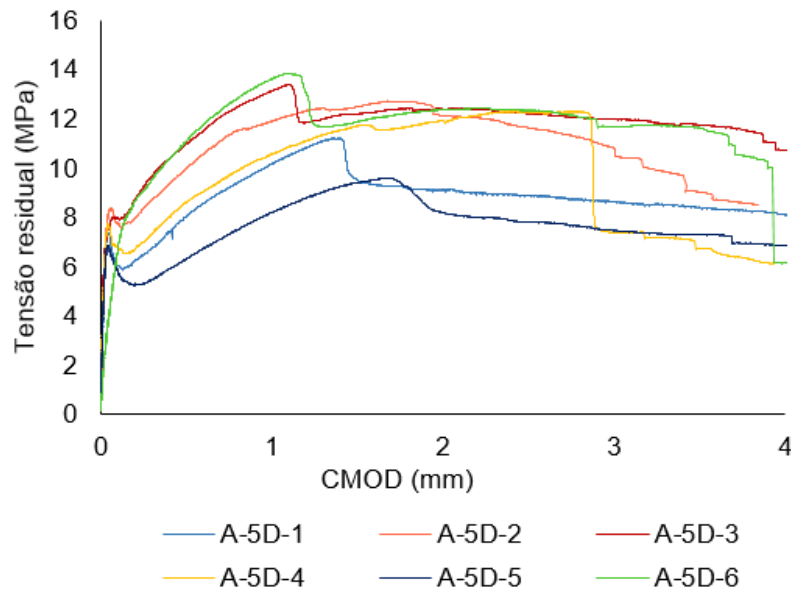


Figura 6.1: Resultados do ensaio de flexão para a composição A-5D

Para esta composição, nota-se alguma dispersão nos resultados. Esta variação pode ser explicada pelo facto de a distribuição das fibras no betão não ser totalmente uniforme, uma vez que é afetada pelos processos inerentes ao fabrico do betão.

A curva a verde corresponde ao ensaio do provete A-5D-6, cujos resultados não foram incluídos na Tabela 6.5, por evidenciar sinais de fissuração anterior ao início do ensaio. O resultado dessa fissuração prévia é manifestado neste gráfico pela menor inclinação do ramo ascendente inicial, comparativamente aos resultados obtidos para os restantes provetes.

Depois de terminado o ensaio de cada provete, foi efetuada, na secção de rotura, a contagem do número de fibras. Identificou-se o número de fibras efetivas, NE (aquelas que apresentavam deformação do gancho de ancoragem), o número de fibras em que se verifica rotura do aço, NR, e o número total de fibras que atravessam a secção, NT. A Tabela 6.7 apresenta o resultado da contagem, apresentando o resultado por unidade de área (m^2).

Tabela 6.7: Número de fibras que atravessam a secção de rotura, por unidade de área

| Proвете | A-5D-1 | A-5D-2 | A-5D-3 | A-5D-4 | A-5D-5 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| NE/ m^2 | 933 | 1667 | 1667 | 1333 | 1733 |
| NR/ m^2 | 1000 | 667 | 1733 | 133 | 467 |
| NE+ NR/ m^2 | 1933 | 2333 | 3400 | 1467 | 2200 |
| NT/ m^2 | 5200 | 6133 | 7000 | 6200 | 5133 |

Comparando os valores da tensão obtidos no ensaio com o número de fibras efetivas em cada provete, conclui-se que o provete que suportou cargas mais elevadas no ensaio, A-5D-3, é aquele que apresenta

um maior número de fibras na secção de rotura. Por outro lado, os provetes A-5D-1 e A-5D-5, apresentaram o menor número de fibras ativas e foram os que obtiveram os valores mais baixos da tensão resistente.

Foi também ajustada a linha de tendência linear que melhor traduz a relação entre NE+NR e os valores das tensões residuais, $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$, apresentada na Figura 6.2

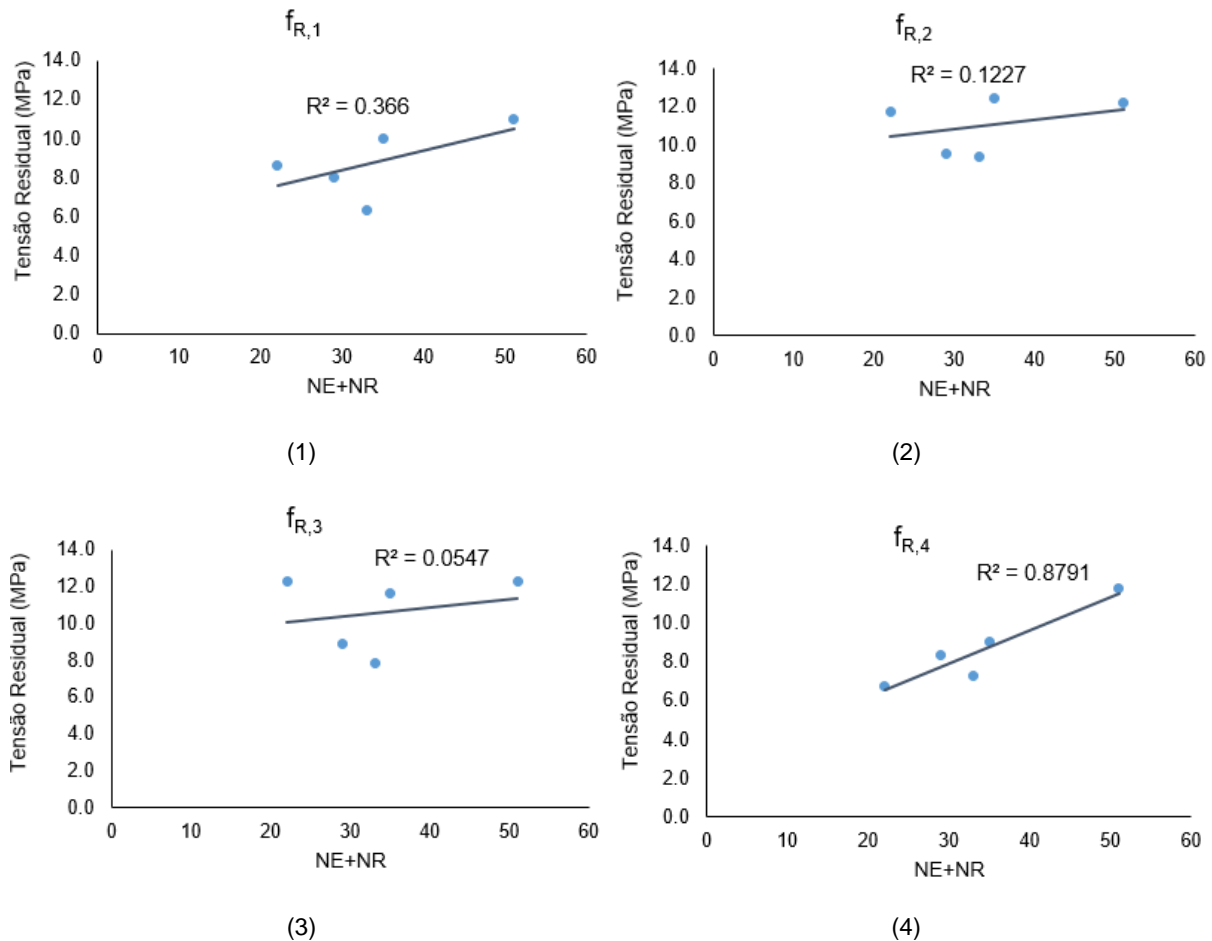


Figura 6.2: Relação entre o NE+NR e as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$.

Uma vez que para aberturas de fenda maiores a contribuição das fibras para o betão é mais preponderante, esperava-se uma correlação superior para as tensões residuais $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$, correspondentes às maiores aberturas de fendas (2,5 mm e 3,5 mm).

A tensão residual $f_{R,4}$, tal como o esperado, apresentou um coeficiente de correlação elevado, igual a 0,8791. Contudo, para $f_{R,3}$, foi de 0,0547, sendo por isso, bastante inferior ao previsto. Esta má correlação é possivelmente consequência da impossibilidade de contabilizar a totalidade de fibras EFETIVAS durante um ensaio, em situações em que a fibra se desvia do plano do entalhe. Em alguns casos, quando as secções na vizinhança do entalhe são mais frágeis, a fenda tende a progredir pela zona que lhe oferece menos resistência. Assim, parte da secção do prisma que no decorrer do ensaio, foi sujeita a tensões de tração, não será visível no plano de rotura, impossibilitando desta forma, a contagem da totalidade de fibras efetivas em cada instante do ensaio.

Para ilustrar o aspeto explicado no parágrafo anterior, as Figura 6.3(a) e (b) apresentam *frames* de um vídeo realizado durante o ensaio do provete A-5D-4. A imagem (a) foi captada para o instante de tempo de ensaio no qual foi medido o CMOD de 3,5 mm ($f_{R,3}$). A imagem (b) foi captada no final do ensaio. Comparando as duas imagens, conclui-se que as fibras ativas no momento do ensaio correspondente à Figura 6.3(a), não são visíveis no plano de rotura.

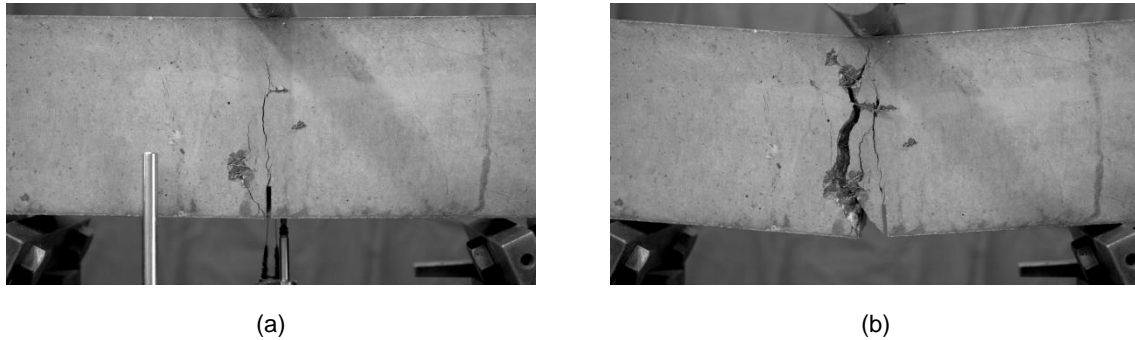


Figura 6.3: Fenda do ensaio de flexão para um CMOD de 3,5 mm e para o final do ensaio.

Analisando agora a linha de tendência linear que melhor traduz a relação entre o número total de fibras e as tensões residuais (Figura 6.4), verifica-se que para as tensões $f_{R,1}$, $f_{R,2}$ e $f_{R,3}$, o coeficiente de correlação linear é superior ao obtido considerando apenas fibras efetivas.

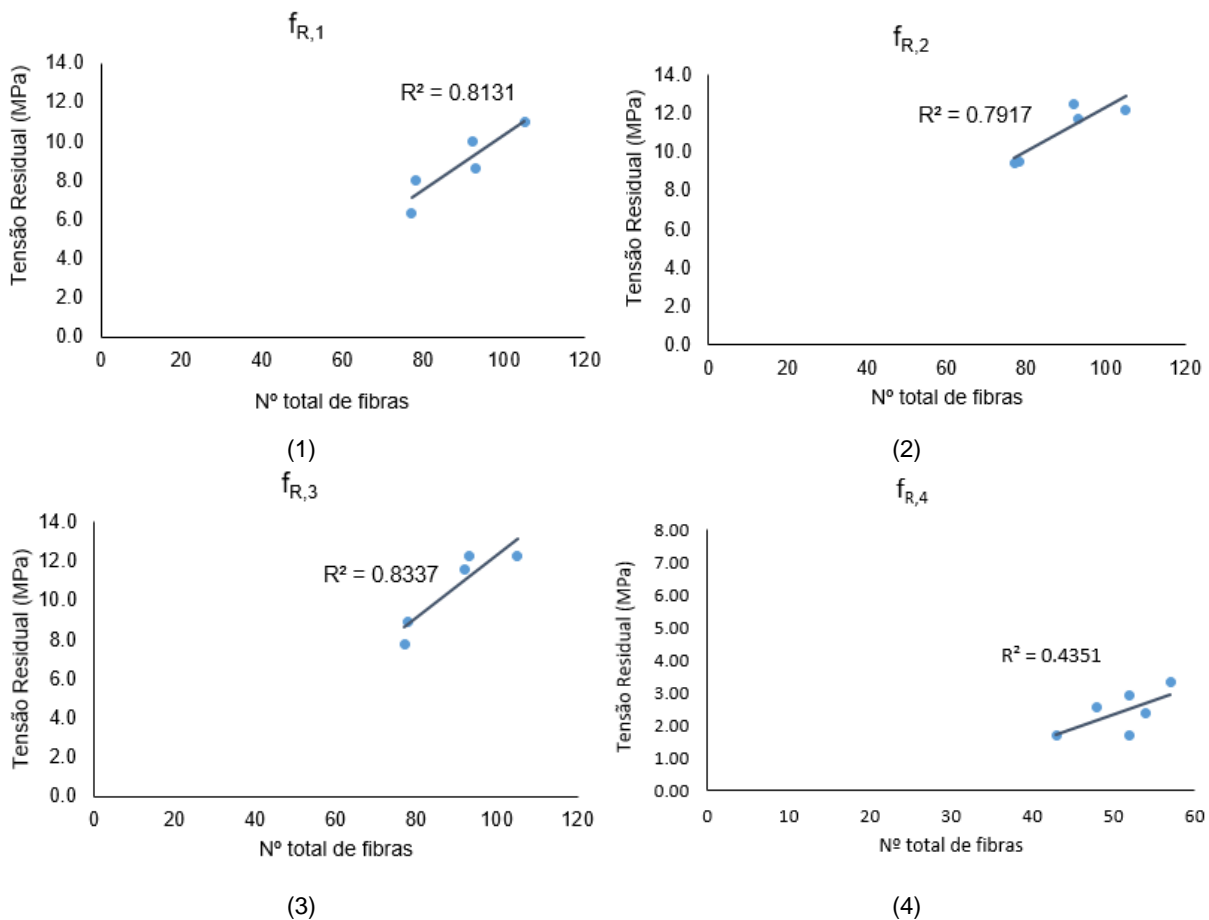


Figura 6.4: Relação entre o número de fibras total e as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$.

6.3.1.2. Ensaio de *pull-out*

Para a composição A-5D, realizaram-se ensaios de *pull-out* variando o comprimento de embebimento, a inclinação e o método de moldagem.

Assim, ensaiaram-se:

- 1) 18 provetes com um l_e igual a 15 mm, 6 para cada uma das inclinações 0° 30° e 60°, moldados individualmente;
- 2) 18 provetes com um l_e igual a 30 mm, 6 para cada uma das inclinações 0° 30° e 60°, moldados individualmente;
- 3) 9 provetes com um l_e igual a 30 mm, 3 para cada uma das inclinações 0° 30° e 60°, moldados em bloco seguindo o procedimento explicado no subcapítulo 5.2.

Os resultados obtidos para $l_e=15\text{mm}$ são apresentados na Figura 6.5.

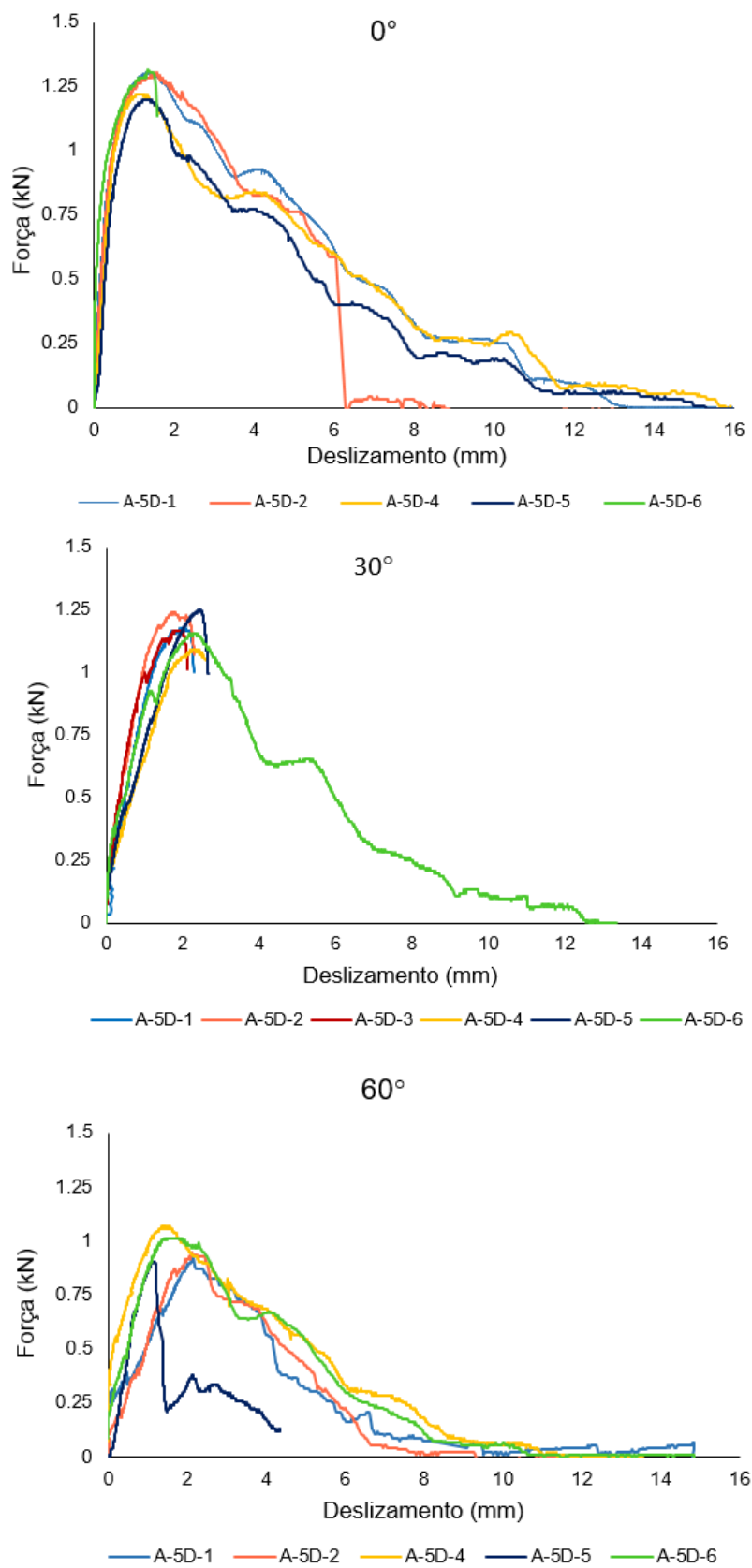


Figura 6.5: Ensaio de *pull-out* realizado para a composição A-5D, para $l_e=15$ mm

Analisando as curvas correspondentes ao ensaio de fibras com $\theta = 0^\circ$, verifica-se que os resultados obtidos foram bastante uniformes em termos de força máxima e respetivo deslizamento. Na sua maioria, a rotura deu-se por arrancamento, com a exceção do provete A-5D-6, em que a fibra rompeu para a carga máxima, e do A-5D-2, cuja fibra rompeu durante a fase de deformação do gancho de ancoragem. Estas variações podem ser explicadas pela não uniformidade na aderência da fibra ao betão para os vários provetes.

O resultado do ensaio do provete A-5D-3, com $\theta = 0^\circ$, foi considerado inválido, uma vez que se verificou escorregamento da fibra sobre a garra. Por esse motivo, os seus resultados não são apresentados.

Para as fibras com $\theta = 30^\circ$, nesta série de ensaios, também foram obtidos comportamentos muito semelhantes. A carga de pico e respetivo deslizamento encontraram-se na mesma ordem de valores para os vários provetes e o modo de rotura predominante foi a rotura da fibra. Contudo, no provete A-5D-6, a fibra foi arrancada. Verificou-se que, neste caso, o destacamento de betão no ponto de saída da fibra, foi superior ao obtido nos outros provetes, o que é evidenciado no gráfico pela quebra existente na parte crescente da curva correspondente ao ensaio (verde). A heterogeneidade do betão, levou a que, neste provete, o material na proximidade da concavidade da fibra fosse menos resistente e, por isso, o destacamento de betão nesta zona foi maior facilitando o deslizamento da fibra.

Na Figura 6.6 é feita uma comparação entre o destacamento tipicamente observado num ensaio de *pull-out* com $\theta = 30^\circ$ (proвете à direita) com o observado para o provete A-5D-6 (proвете à esquerda).



Figura 6.6: Ensaio de *pull-out* realizado para a composição A-5D, para $l_e = 15$ mm, com $\theta = 30^\circ$.

Por fim, nos ensaios com $\theta = 60^\circ$, tal como era esperado, nota-se uma maior dispersão nos resultados, principalmente para os valores de deslizamento na carga máxima. Isto pode ser justificado pelas diferentes quantidades de betão que são removidas dos vários provetes durante o ensaio, devido à heterogeneidade associada à composição de betão. Observa-se também, que o comportamento do provete A-5D-5 foi totalmente distinto dos restantes. Isto deveu-se à elevada aderência entre os dois componentes, que levou a que o betão fosse arrancado juntamente com a fibra, impedindo a total deformação do gancho de extremidade. O resultado é ilustrado na Figura 6.7.



Figura 6.7: Ensaio de *pull-out* do provete A-5D-5, com $\theta = 60^\circ$.

Na Figura 6.8 são apresentados os resultados do ensaio de *pull-out* para l_e de 30mm. A coluna da esquerda corresponde aos ensaios feitos em provetes moldados individualmente, a da direita às carotes retiradas de um bloco de betão.

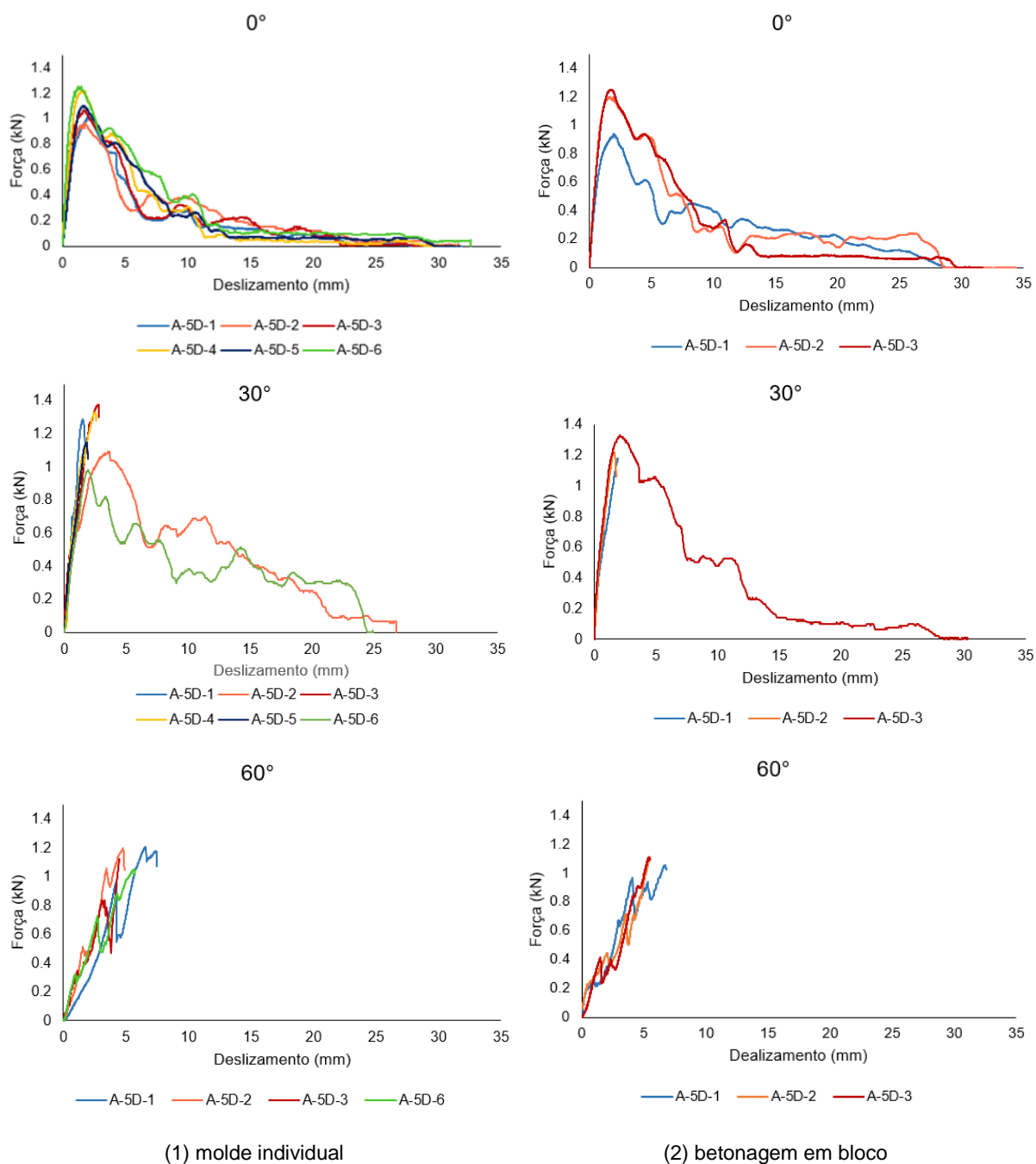


Figura 6.8: Ensaio de *pull-out* para a composição A-5D, para $l_e = 30$ mm.

Nesta série de ensaios, verificou-se uma dispersão significativa de valores nos resultados obtidos para ambos os métodos de moldagem. A variação dos resultados obtidos pode ser explicada por uma aderência da fibra não uniforme para os vários provetes. Em parte, isso deveu-se ao processo de vibração. Conforme referido, foi utilizado para o efeito uma mesa de vibração. Contudo, o facto de a base do molde ser uma placa de XPS contribuiu para amortecer as vibrações induzidas pela mesa, prejudicando em parte o processo de vibração.

Nos dois métodos de moldagem, o comportamento das fibras com $\theta = 0^\circ$, manteve-se uniforme em termos de deslizamento na força máxima e modo de rotura (arrancamento), verificando-se, no entanto, uma variação da força máxima obtida em cada ensaio. Para os provetes moldados individualmente, é notória a diferença de capacidade resistente do A-5D-4 e A-5D-6, quando comparada com os restantes, dado que foram arrancados para uma carga consideravelmente superior.

Nos provetes obtidos por carotagem, o comportamento foi idêntico tendo o A-5D-1 suportado uma carga bastante inferior à do A-5D-2 e A-5D-3.

Na inclinação 30° , observam-se variações nos três parâmetros (força máxima, respetivo deslizamento e modo de rotura). Os provetes moldados individualmente dividem-se em 3 grupos. O A-5D-1, A-5D-3, A-5D-4 e A-5D-5, registaram valores de força máxima superiores para pequenos deslizamentos, verificando-se rotura da fibra. No A-5D-2 e A-5D-6, a fibra foi arrancada, tendo suportado uma carga baixa, tendo-se registado no A-5D-2 um deslizamento na força máxima muito superior ao do A-5D-6.

Nos provetes obtidos por carotagem, a carga máxima e o respetivo deslizamento mantiveram-se constantes. No entanto, o modo de rotura do provete A-5D-3 distinguiu-se dos restantes tendo a fibra sido arrancada. Neste caso, esta variação foi provocada pelo erro associado à inclinação. Isto é, durante a produção do molde existe alguma influência do operador, uma vez que as fibras são fixas manualmente e por este motivo, é difícil manter a inclinação, dos vários provetes, totalmente correta. A inclinação da fibra no provete A-5D-3 foi, na realidade, de 15° e, como tal, a fibra foi capaz de suportar uma carga elevada sem romper.

Os resultados dos ensaios das fibras com inclinação de 60° foram semelhantes em ambos os métodos. De acordo com o esperado, os parâmetros mantiveram-se uniformes ao longo dos vários ensaios, com exceção do deslizamento. No ensaio dos provetes A-5D-4 e A-5D-5, houve escorregamento da fibra sobre a garra, por isso o ensaio desses provetes foi considerado inválido.

6.3.1.3. Análise de imagem

Com vista a estudar a distribuição e orientação das fibras nos prismas fabricados com betão A-5D, efetuou-se a análise de imagem em 24 faces dos prismas após o ensaio de flexão, seguindo o procedimento apresentado no subcapítulo 5.2.

Como se verificou que para as duas faces resultantes do mesmo corte, os valores resultantes da análise eram muito semelhantes (conforme seria de esperar numa situação em que o erro associado à análise de imagem é reduzido), serão apresentados os valores médios para cada secção.

Calculou-se também, para esta composição, o número teórico de fibras por unidade de área, de acordo com a proposta de (Dupont e Vandewalle, 2005), referida no capítulo 2. Para tal, determinou-se o fator de orientação global (de acordo com o procedimento apresentado no sub-capítulo 2.4.3.), resultando $\alpha = 0,6024$. Obtem-se assim um valor teórico de 6031 fibras/m².

A Tabela 6.8 apresenta o número de fibras contadas em cada secção bem como a respetiva inclinação média (valor médio do ângulo θ), bem como a razão do número de fibras real, obtido por análise de imagem, pelo teórico, $\left(\frac{NR}{NT}\right)$

Tabela 6.8: Número de fibras que atravessam as secções próximas do entalhe, por unidade de área.

| Provete | Secção 1 | | | | Secção 2 | | | |
|---------|------------------|-----|-------|-----------------|------------------|-----|-------|-----------------|
| | Inclinação média | NR | NR/m2 | $\frac{NR}{NT}$ | Inclinação média | NR | NR/m2 | $\frac{NR}{NT}$ |
| A-5D-1 | 31,6 | 159 | 7067 | 1.17 | 34,2 | 173 | 7689 | 1.27 |
| A-5D-2 | 32,8 | 172 | 7644 | 1.27 | 33,2 | 156 | 6933 | 1.15 |
| A-5D-3 | 34,9 | 217 | 9644 | 1.60 | 29,8 | 137 | 6089 | 1.01 |
| A-5D-4 | 34,1 | 159 | 7067 | 1.17 | 34,2 | 155 | 6889 | 1.14 |
| A-5D-5 | 34,9 | 138 | 6133 | 1.02 | 34 | 151 | 6711 | 1.11 |
| A-5D-6 | 30,2 | 152 | 6756 | 1.12 | 31,3 | 202 | 8978 | 1.49 |

Dado que as secções de corte apresentam um afastamento considerável entre si, a comparação do número de fibras contado em cada uma, permite tirar algumas conclusões relativamente à distribuição das fibras no betão.

Da análise da tabela, uma vez que a variação do número de fibras existentes nas duas secções do provete A-5D-4 é de 4, a distribuição é praticamente uniforme. Já nos provetes, A-5D-1, A-5D-2 e A-5D-5, de um modo geral a distribuição das fibras sofre uma pequena variação. Finalmente, o A-5D-3 A-5D-6, apresentam uma grande variação na densidade de fibras entre secções, neste caso, a distribuição é não uniforme, consequência dos processos associados ao fabrico do betão.

Comparando agora os valores obtidos por análise de imagem com os valores teóricos quantificados de acordo com a proposta de Dupont e Vandewalle (2005), conclui-se que o valor teórico é ligeiramente inferior ao real, uma vez que, de um modo geral, a razão dos dois valores é superior a 1. Em alguns casos, como o da secção 1 do provete A-5D-3, existe uma disparidade bastante grande.

Na Figura 6.8, são apresentados histogramas com a distribuição do número de fibras para cada inclinação.

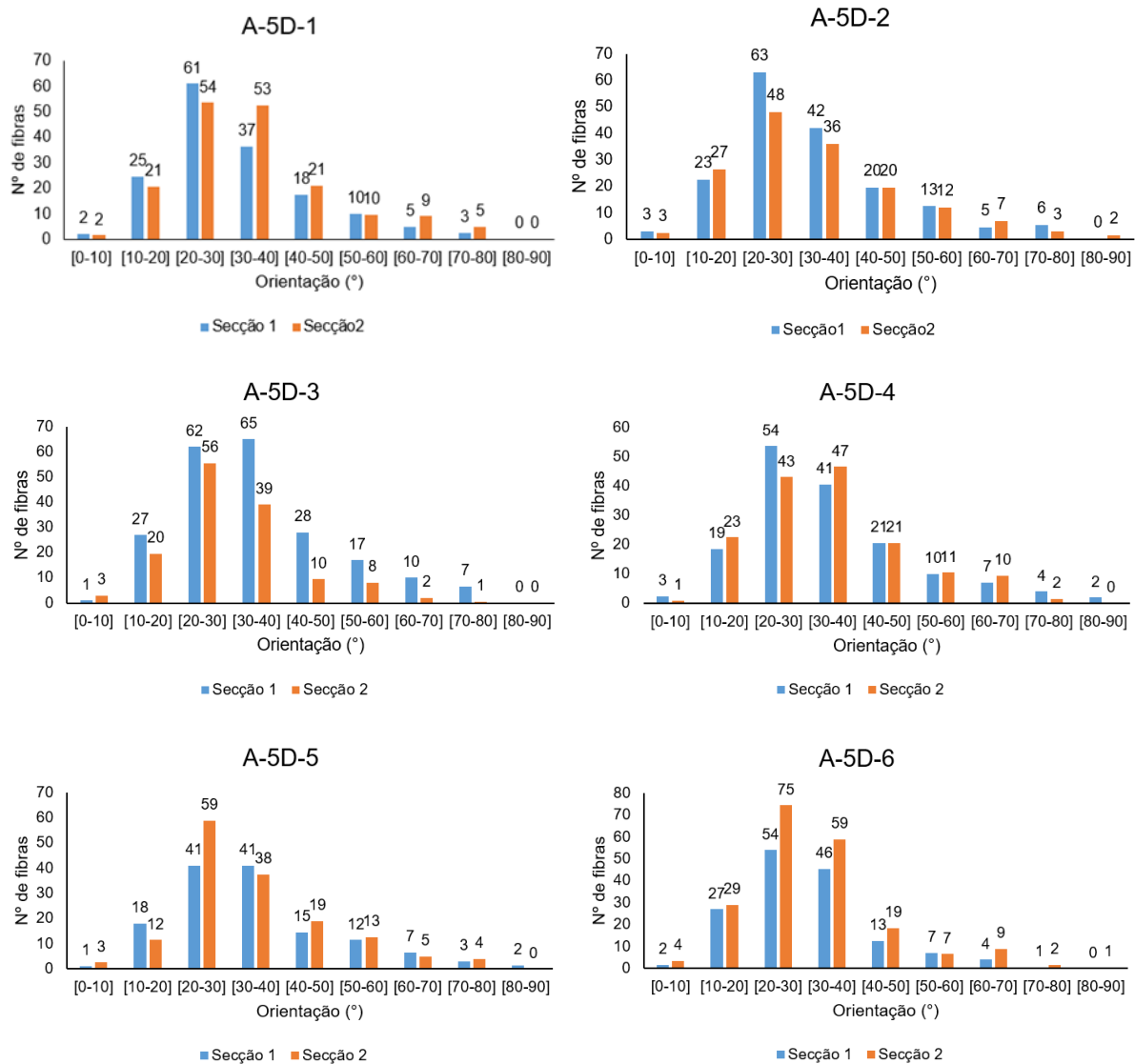


Figura 6.9: Histogramas correspondentes à distribuição do número de fibras para cada inclinação

Analisando os vários histogramas observa-se que a dispersão das fibras nas várias inclinações parece seguir, aproximadamente, uma distribuição normal. Observa-se também que na maioria dos casos as fibras se encontram orientadas entre os 20° e 30°, com exceção da secção 1 do provete A-5D-3, em que se encontram principalmente entre os 30° e 40°.

6.3.2. BETÃO A-4D

6.3.2.1. Ensaio de flexão

Para a composição A-4D, foram ensaiados 6 prismas à tração por flexão. O resultando destes ensaios é apresentado na Figura 6.10

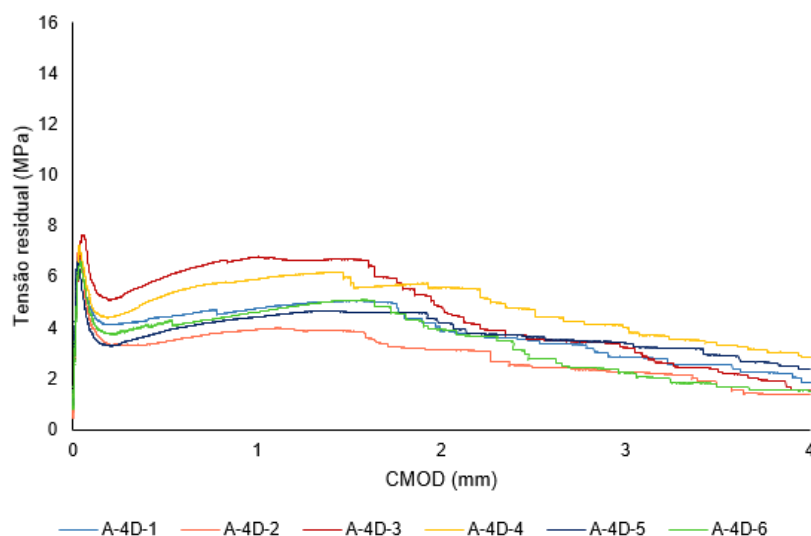


Figura 6.10: Resultados dos ensaios de tração por flexão para a composição A-4D

Da análise dos gráficos da Figura 6.10, verifica-se que as tensões resistidas para a composição A-4D, foram bastante inferiores aos da composição A-5D. Por outro lado, no intervalo de 2 a 4 mm de CMOD, nota-se uma queda gradual da carga resistida pelos prismas.

Após o ensaio, contou-se do número de fibras efetivas e partidas na secção de rotura. Os resultados desta contagem são indicados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9: Número de fibras por unidade de área que atravessam a secção de rotura

| Provete | A-4D-1 | A-4D-2 | A-4D-3 | A-4D-4 | A-4D-5 | A-4D-6 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| NE/m2 | 467 | 267 | 400 | 533 | 667 | 667 |
| NR/m2 | 1667 | 933 | 1800 | 1933 | 933 | 1667 |
| NE+NR/m2 | 2133 | 1200 | 2200 | 2467 | 1600 | 2333 |
| NT/m2 | 3200 | 2867 | 3600 | 3800 | 3467 | 3467 |

Analisando os valores da contagem de fibras, verifica-se que nesta composição, o número de fibras que romperam durante o ensaio é superior ao obtido para as outras composições. Por outro lado, o número total de fibras que atravessam a secção é inferior.

Relacionando os valores apresentados na tabela com as curvas obtidas no ensaio de flexão, verifica-se que o provete que apresentou o valor mais baixo na contagem de fibras (A4D-2), foi também o que exibiu o pior comportamento no ensaio.

Na Figura 6.10, é apresentada a linha de tendência linear que melhor traduz a relação entre o número de fibras ativas durante o ensaio (NE+NR) e os valores obtidos para as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, e $f_{R,4}$.

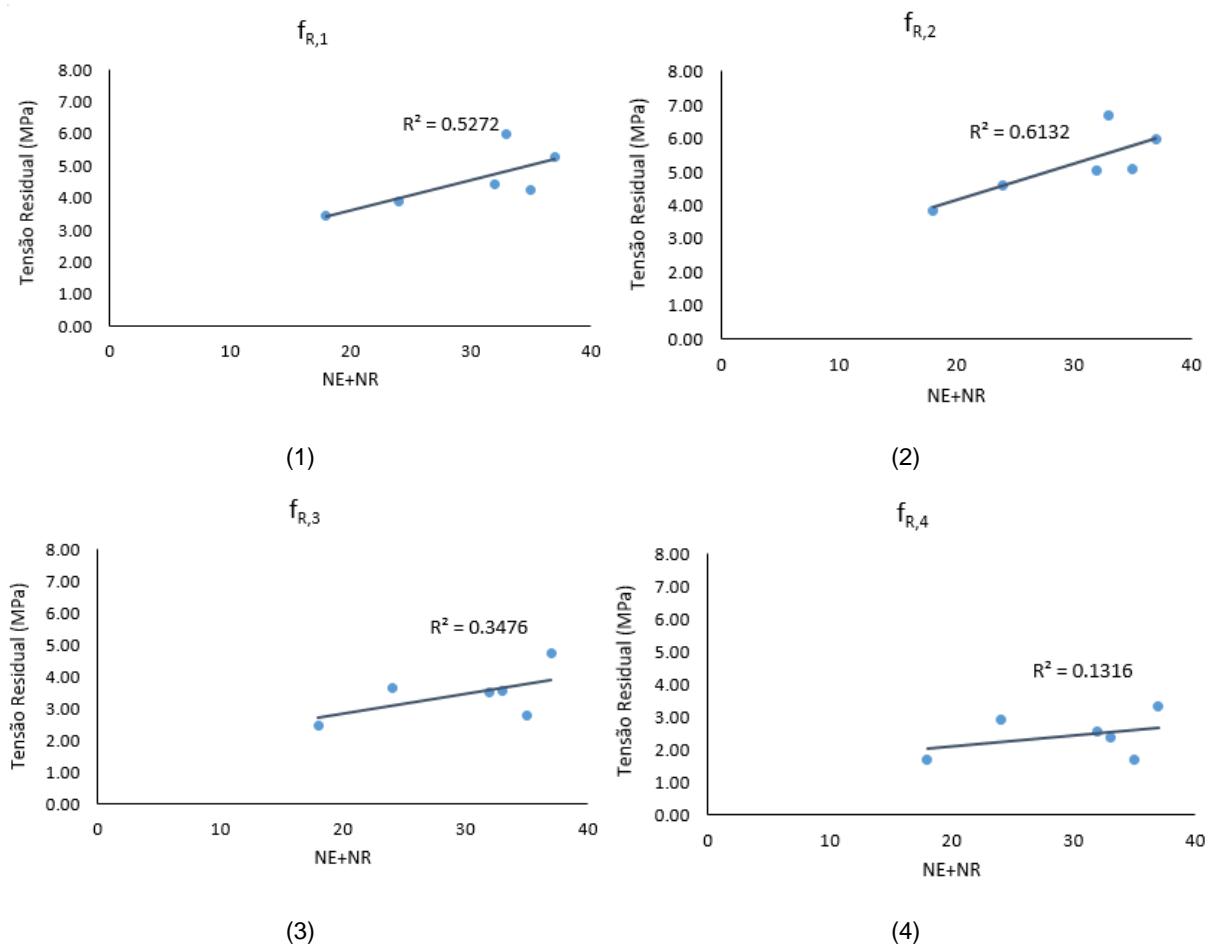


Figura 6.11: Relação entre NE+NR e as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$.

Observando os resultados obtidos, verifica-se que não existe uma boa correlação entre os valores de tensão residual e o número de fibras ativas. Por outro lado, contrariamente ao esperado, os valores mais altos do coeficiente de correlação correspondem às tensões $f_{R,1}$ e $f_{R,2}$, isto é, para aberturas de fenda inferiores. Uma explicação para estes resultados é facto de, na grande maioria dos provetes, a maior parte das fibras efetivas ter rompido durante o ensaio, e por este motivo, o número de fibras em funcionamento diminuir gradualmente com a progressão do CMOD. Assim sendo, para as tensões $f_{R,3}$, e $f_{R,4}$, o número de fibras em funcionamento pode ser inferior ao que resulta da contagem.

Na Figura 6.12 é feito o ajuste da linha de tendência linear que melhor traduz a relação entre as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$ e o número total de fibras contabilizado na secção de rotura. De um modo geral, o coeficiente de correlação linear obtido neste caso foi superior ao obtido quando foram apenas consideradas fibras efetivas. No entanto, tal como no caso das fibras efetivas, o valor mais alto deste coeficiente correspondeu aos valores mais baixos de abertura de fendas.

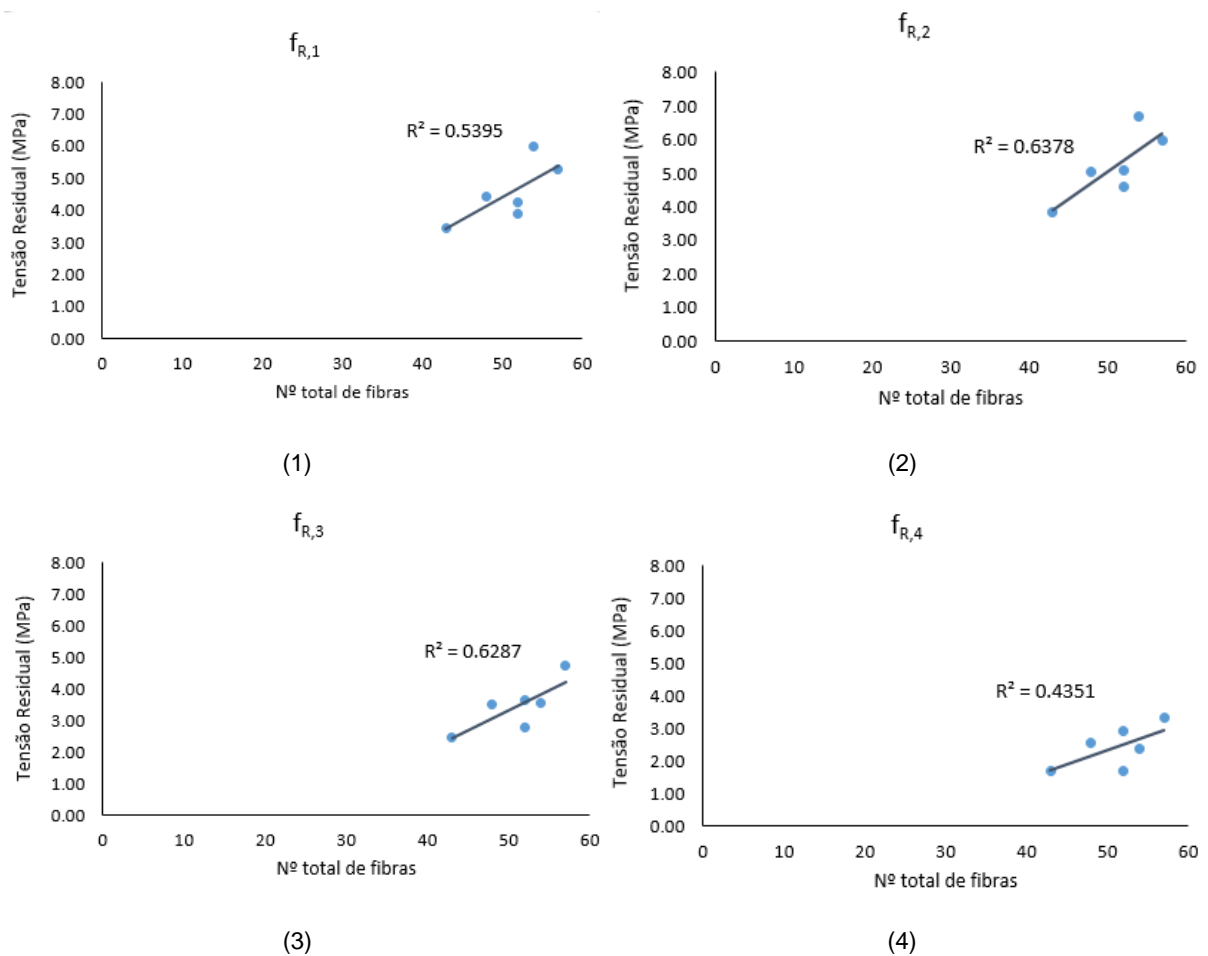


Figura 6.12: Relação entre o número total de fibras e as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$.

6.3.2.2. Ensaio de *Pull-out*

A composição A-4D foi testada ao arrancamento para um l_e igual a 15mm. Foram novamente ensaiados 6 provetes para cada inclinação (0° , 30° e 60°). Os resultados obtidos neste estudo, encontram-se na Figura 6.13.

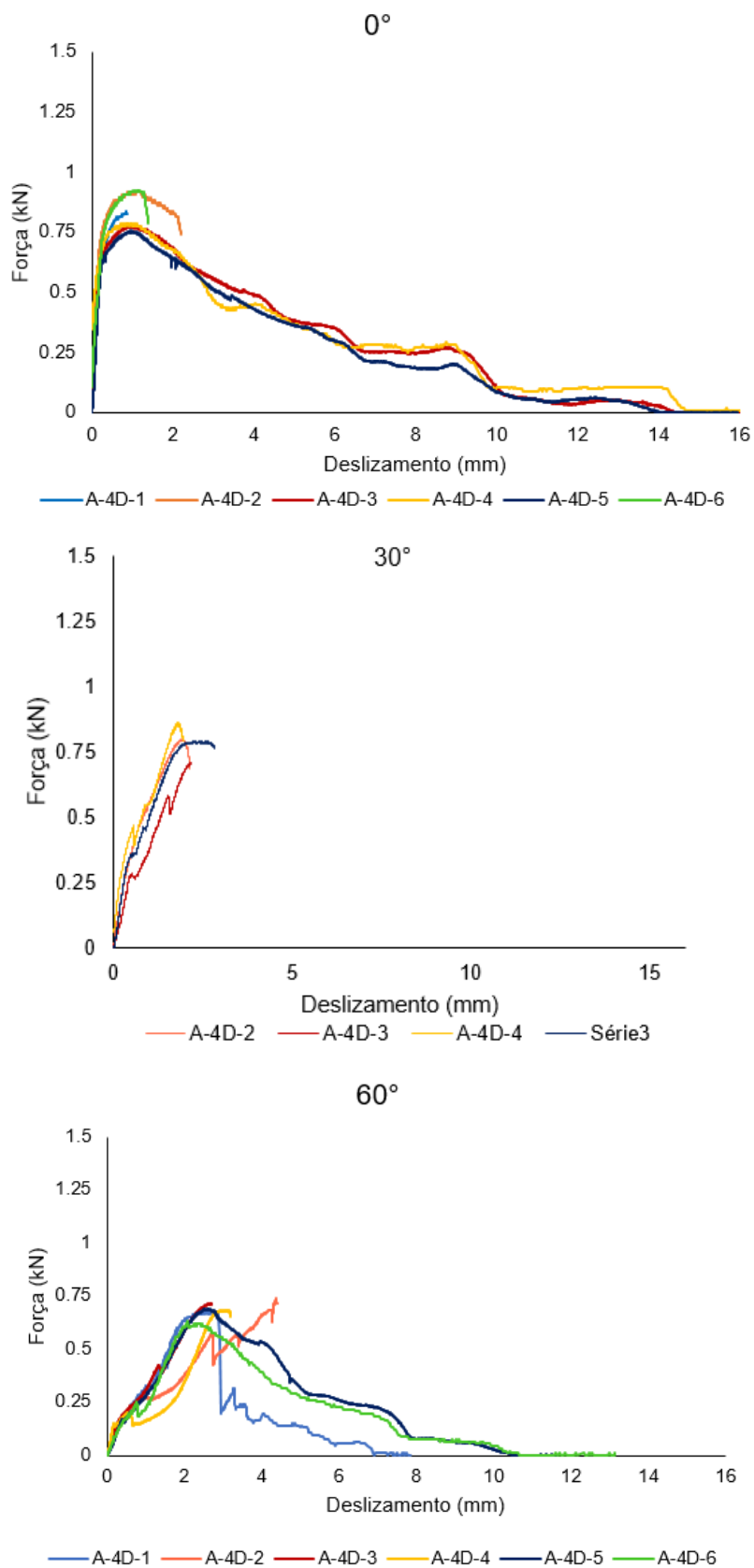


Figura 6.13: Ensaio de *pull-out* realizado para a composição A-4D, para $l_e=15$ mm

Da análise dos resultados obtidos, observa-se que os valores correspondentes à inclinação 0° podem ser divididos em dois grupos distintos. O primeiro inclui os provetes A-5D-3, A-5D-4 e A-5D-5, que apresentam valores próximos da força máxima e respetivo deslizamento e cujo modo de rotura foi o arrancamento. No segundo grupo, com os provetes A-5D-1, A-5D-2 e A-5D-6, a rotura ocorreu para a carga máxima, havendo alguma dispersão de resultados.

Já nos 30° de inclinação, os resultados foram bastante uniformes. As fibras romperam para a força máxima, sendo que em todos os provetes este valor e o respetivo deslizamento encontram-se na mesma ordem de valores.

Nos 60° de inclinação, nota-se novamente alguma dispersão nos resultados obtidos. Os valores da força máxima são muito semelhantes. Contudo, conforme o esperado, o deslizamento correspondente é afetado por alguma variação, em especial para o provete A-4D-2, que sofreu um deslizamento superior ao dos restantes. Este provete foi mais afetado pelo efeito de *spalling*, o que é evidenciado pelas quebras existentes na parte crescente da curva do ensaio (laranja). Como já foi referido, quando o destacamento de betão é acentuado, torna-se mais fácil o deslizamento da fibra.

6.3.3. BETÃO B-5D

6.3.3.1. Ensaio de Flexão

Para a composição B-5D, foram ensaiados à tração por flexão 9 prismas. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 6.14.

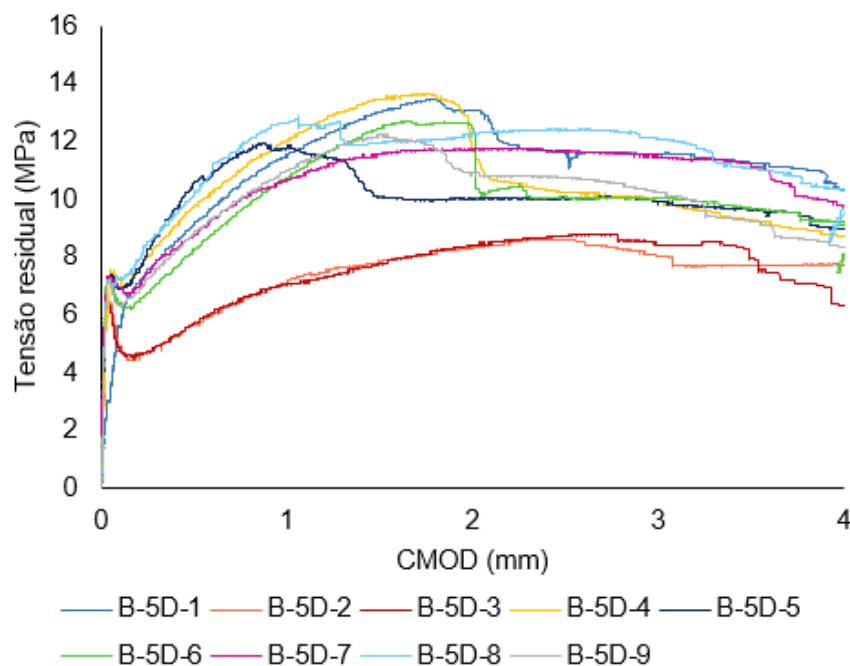


Figura 6.14: Resultados dos ensaios de flexão para a composição B-5D.

Observando as curvas obtidas, notam-se dois grupos de provetes com tensões resistentes muito diferentes. Os provetes, B-5D-2 e B-5D-3, apresentam comportamentos muito idênticos, apresentando

os valores mais baixos da tensão resistida. Os restantes provetes apresentam alguma dispersão de resultados, contudo, de modo geral, apresentam comportamentos semelhantes.

O comportamento do provete B-5D-1 (curva azul), foi comprometido antes do ensaio. Isso é evidenciado pelo afastamento do segmento inicial da curva do ensaio relativamente ao dos restantes provetes. Por este motivo, este provete foi excluído das tabelas anteriores onde se apresentou o valor das tensões residuais.

Após o ensaio, foi efetuada a contagem do número de fibras efetivas na secção de rotura. Para esta composição, pelo facto de apresentarem uma percentagem pouco significativa, não se considerou o número de fibras partidas. Os valores obtidos são indicados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10: Número de fibras que atravessam a secção de rotura por unidade de área.

| Proвете | B-5D-1 | B-5D-2 | B-5D-3 | B-5D-4 | B-5D-5 | B-5D-6 | B-5D-7 | B-5D-8 | B-5D-9 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| NE/ m2 | 2533 | 1533 | 1200 | 1800 | 2667 | 2067 | 2933 | 2467 | 2133 |
| NT/m2 | 6400 | 5133 | 4733 | 6133 | 5533 | 6600 | 7400 | 5667 | 7200 |

Comparando os valores obtidos por contagem das fibras com os diagramas obtidos no ensaio, verifica-se que existe uma relação entre o número de fibras efetivas e o valor de tensão resistida nos ensaios. Os provetes B-5D-2 e B-5D-3 são os que apresentam pior desempenho no ensaio, sendo também os que apresentam valores mais baixos na contagem de fibras. Já os provetes B-5D-7 e B-5D-8 ostentam o maior número de fibras consideradas como efetivas, combinado com um melhor desempenho no ensaio.

Salienta-se o facto de os processos de contagem terem sido feitos manualmente, motivo pelo qual se torna necessário considerar algum grau de incerteza.

Por fim, ajustaram-se curvas de tendência linear às relações entre o número de fibras efetivas e os valores de tensão residual nos vários provetes. Os valores obtidos são apresentados na Figura 6.15.

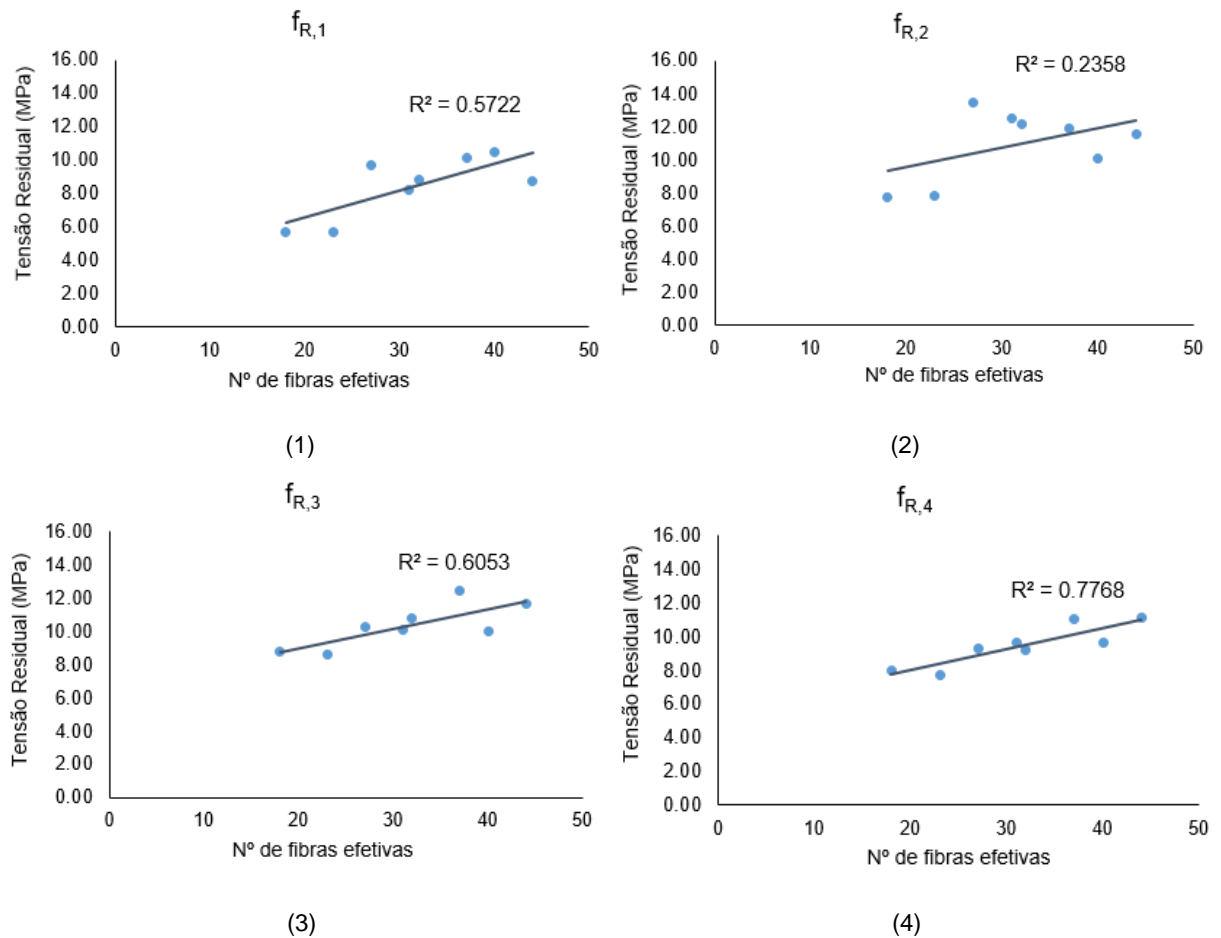


Figura 6.15: Relação entre o número de fibras efetivas e as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$.

Analisando os valores obtidos para o coeficiente de correlação linear, verifica-se que, tal como o esperado, assumem valores superiores para as tensões $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$. Isto é justificado pelo facto de o mecanismo de reforço proporcionado pelas fibras consideradas como efetivas ser mais predominante para aberturas de fendas maiores.

Na composição B-5D, o ajuste da linha de tendência linear que relaciona as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$ com o número total de fibras existentes na secção de rotura (Figura 6.16) resultou num coeficiente de correlação linear mais baixo do que o obtido, considerando o número de fibras efetivas.

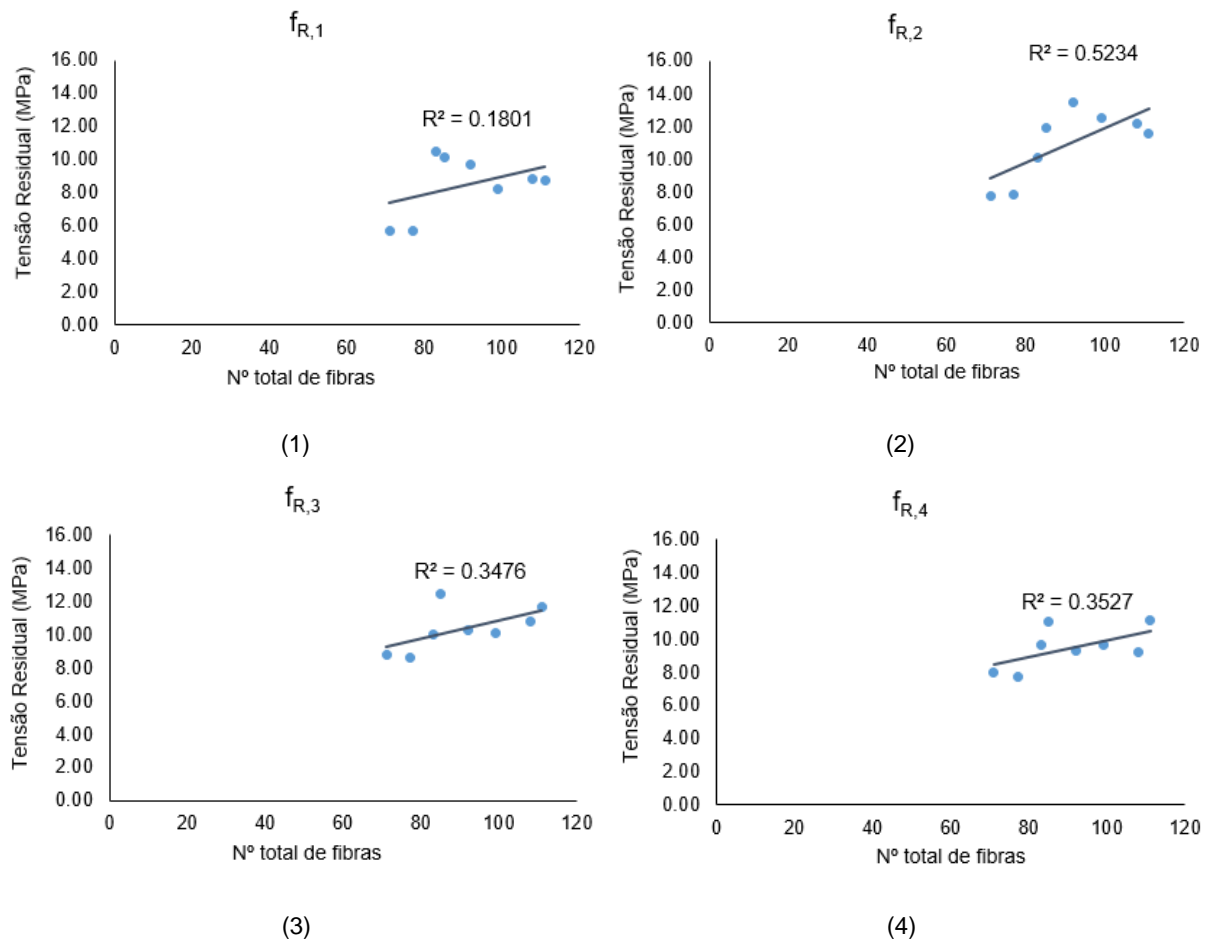


Figura 6.16: Relação entre o número total de fibras e as tensões residuais $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$.

6.3.3.2. Ensaio de *Pull-out*

O ensaio de *pull-out* na composição B-5D, foi efetuado para um l_e igual a 15 mm, tendo-se estudado novamente as inclinações 0° , 30° e 60° . Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.17.

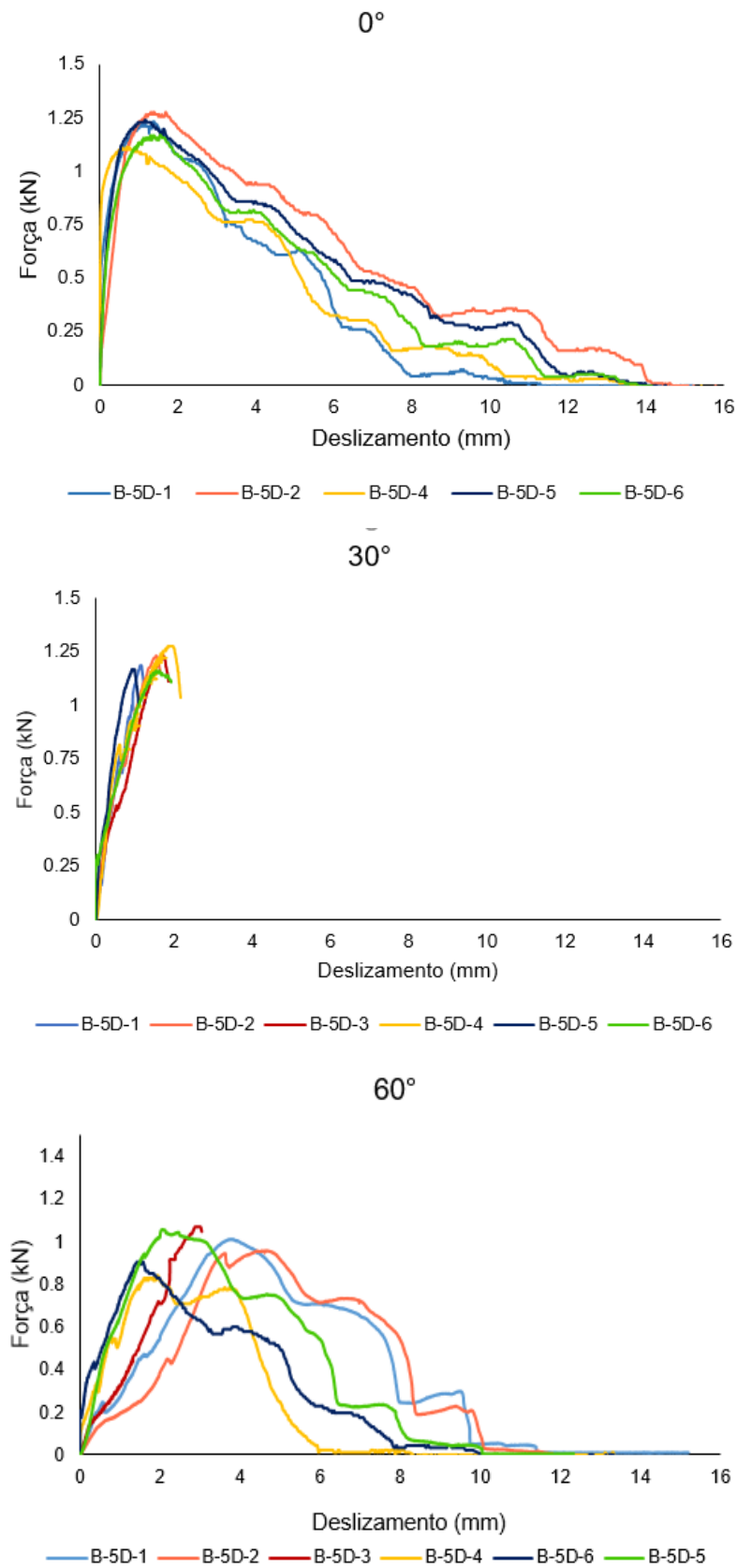


Figura 6.17: Ensaio de *pull-out* realizado para a composição B-5D para um $l_e=15$ mm

Observando as curvas resultantes dos vários ensaios conclui-se que, para a inclinação 0°, o comportamento dos vários provetes foi semelhante relativamente à carga de pico e respetivo deslizamento, bem como, no modo de rotura (arrancamento). A variação de valores pode ser explicada pelo erro associado às inclinações reais (que diferem do valor teórico de 0°). Nomeadamente, a inclinação real do provete B-5D-2 foi de 10° o que faz com que a carga máxima resistida fosse ligeiramente superior. Contudo, estas variações nos resultados do ensaio são pouco importantes. Os resultados obtidos para o provete B-5D-3 não são apresentados por se ter considerado o ensaio inválido.

Já para a inclinação 30°, o modo de rotura predominante foi a rotura da fibra. Verificou-se apenas um aumento do valor de deslizamento na força máxima do provete B-5D-4, no entanto analisando a parte crescente da curva do ensaio, verificou-se que apresentava muitas quebras, concluindo-se assim que uma maior quantidade de betão foi destacada neste provete, facilitando o deslizamento.

Por fim, os 60° de inclinação obtiveram, nesta série de ensaios, uma elevada variação dos resultados relativamente à carga máxima e também ao deslizamento. A instabilidade de valores é típica nesta orientação, pelo facto de ser mais afetada pelo efeito de spalling e pela heterogeneidade do betão. O modo de rotura predominante neste caso, foi o arrancamento da fibra.

6.3.3.3. Análise de imagem

Este estudo foi complementado com a análise de imagem de 36 faces resultantes do seccionamento dos prismas após ensaio. Porém, uma vez que se verificou que os resultados das faces que integravam a mesma secção eram muito semelhantes, serão apresentados os valores médios de cada secção.

Compara-se novamente o número teórico de fibras por unidade de área de acordo com a proposta de (Dupont e Vandewalle, 2005), com os valores obtidos na contagem de fibras por análise de imagem.

Uma vez que o número teórico depende apenas da geometria da peça e das características das fibras, mantém-se igual ao calculado para a composição anterior (6031 fibras/m²).

A Tabela 6.11 apresenta o número de fibras contadas em cada secção bem como a respetiva inclinação média, bem como a razão do número de fibras real pelo teórico, $\left(\frac{NR}{NT}\right)$.

Verificou-se que, de um modo geral, não existe uniformidade na distribuição das fibras ao longo do provete, o que demonstra que, neste caso, os provetes foram bastante influenciados pelos processos associados à produção de betão. Relativamente à relação entre o número de fibras teórico e o real, verifica-se novamente que o valor teórico é ligeiramente inferior ao real.

A inclinação média manteve-se constante, sendo novamente próxima dos 30° a 40°.

Tabela 6.11: Número de fibras que atravessam a secção do entalhe por unidade de área.

| Provete | Secção 1 | | | | Secção 2 | | | |
|---------|------------------|-----|-------------------|------------------------------|------------------|-----|-------------------|------------------------------|
| | Inclinação média | NT | NT/m ² | $\left(\frac{NR}{NT}\right)$ | Inclinação média | NT | NT/m ² | $\left(\frac{NR}{NT}\right)$ |
| B-5D-1 | 32 | 156 | 6933 | 1.15 | 31 | 138 | 6 133 | 1.02 |
| B-5D-2 | 33 | 172 | 7644 | 1.27 | 34 | 144 | 6 400 | 1.06 |
| B-5D-3 | 38 | 169 | 7511 | 1.25 | 45 | 106 | 4 711 | 0.78 |
| B-5D-4 | 30 | 188 | 8356 | 1.39 | 33 | 158 | 7 022 | 1.16 |
| B-5D-5 | 34 | 167 | 7422 | 1.23 | 30 | 217 | 9 644 | 1.60 |
| B-5D-6 | 35 | 134 | 5956 | 0.99 | 32 | 168 | 7 467 | 1.24 |
| B-5D-7 | 35 | 174 | 7733 | 1.28 | 29 | 245 | 10 889 | 1.81 |
| B-5D-8 | 31 | 164 | 7289 | 1.21 | 30 | 203 | 9 022 | 1.50 |
| B-5D-9 | 31 | 162 | 7200 | 1.19 | 29 | 269 | 11 956 | 1.98 |

Na Figura 6.18 apresentam-se os histogramas relativos à distribuição das fibras em intervalos de orientações.

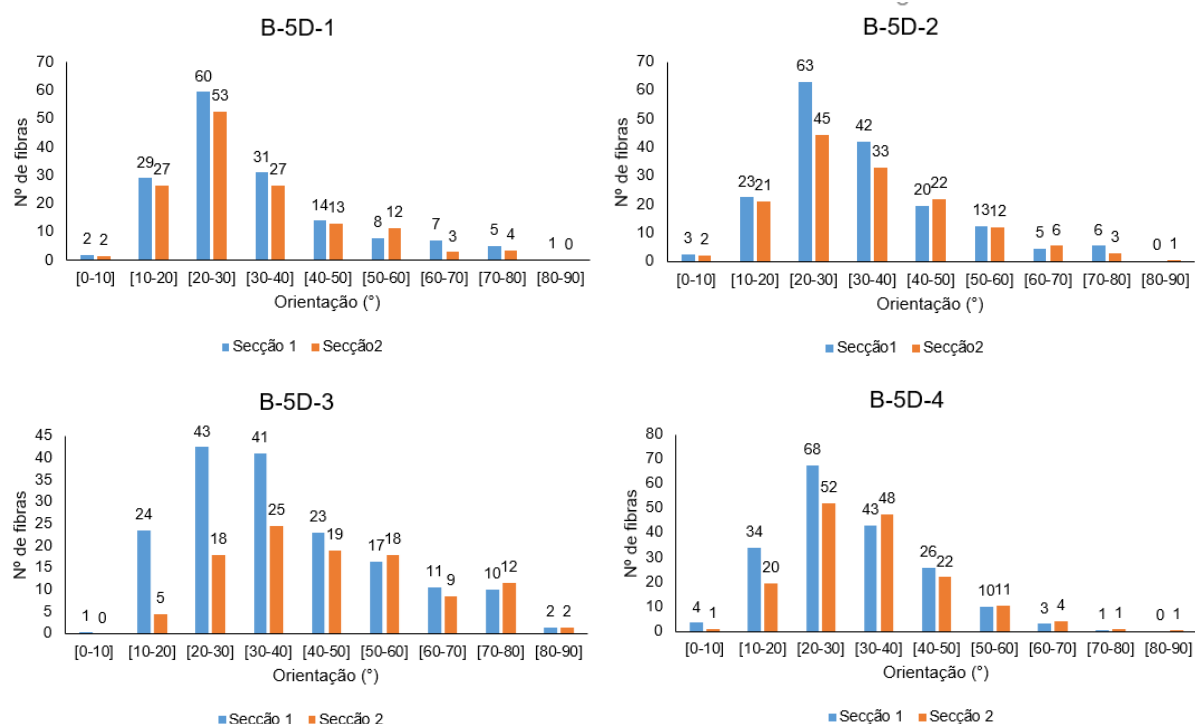


Figura 6.18: Histogramas correspondentes à distribuição do número de fibras para cada inclinação

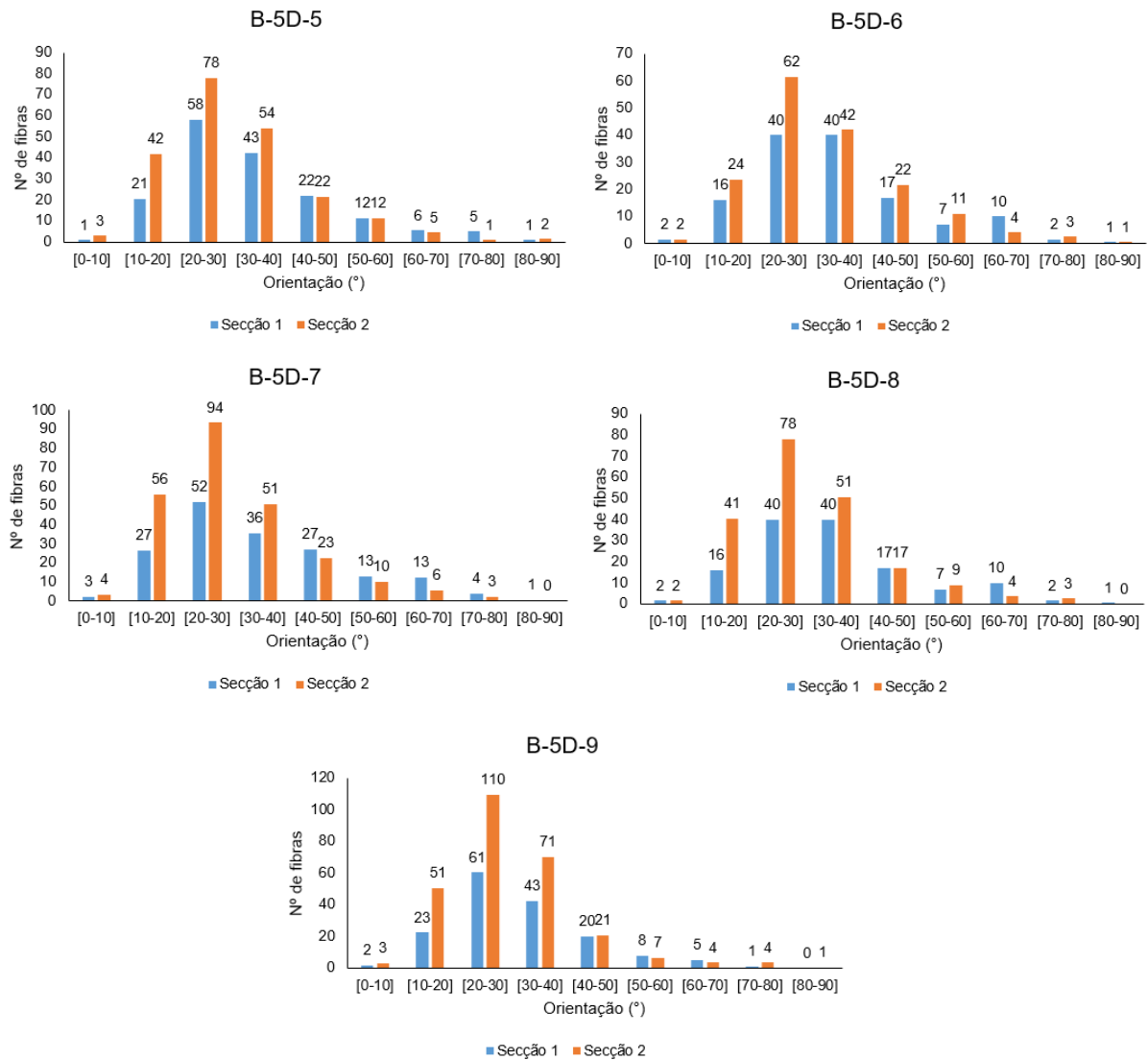


Figura 6.18: Histogramas correspondentes à distribuição do número de fibras para cada inclinação, continuação.

Observando os histogramas, é notória a disparidade entre o número de fibras de cada secção do mesmo provete. Isto acontece em especial para os provetes B-5D-3, B-5D-7, B-5D-8 e B-5D-9.

Relativamente à variação das orientações na secção, manteve mais uma vez uma distribuição que se assemelha à normal. Encontra-se uma maior percentagem de fibras para os intervalos de orientações 20° a 30° e 30° a 40°.

7

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

7.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo é feito um estudo da influência, no comportamento do BRFA, dos seguintes parâmetros: inclinação, tipo de fibra e matriz cimentícia. Toma-se como base para esta análise os resultados obtidos experimentalmente, previamente apresentados. O estudo é feito em função dos valores médios obtidos para cada composição.

Em primeiro lugar, é abordada a influência da orientação nos valores da força máxima e respetivo deslizamento nos ensaios de pull-out, bem como, no modo de rotura obtido nesse ensaio. Seguidamente, é avaliado o desempenho do BRFA para os dois tipos de fibra e composições utilizadas.

7.2. INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO, TIPO DE FIBRA E MATRIZ CIMENTÍCIA NOS ENSAIOS DE PULL-OUT

Na Figura 7.1, apresenta-se, em termos médios, a evolução da força máxima e do respetivo deslizamento com o aumento da inclinação para as várias composições de betão.

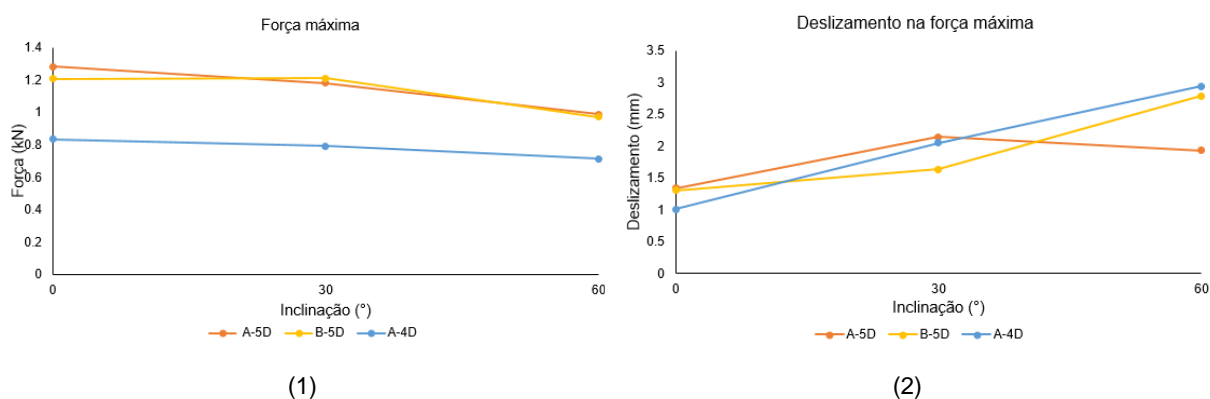


Figura 7.1: Evolução da força máxima e respetivo deslizamento, em função da inclinação.

Relativamente à força máxima, observa-se uma diferença de comportamentos para as várias composições. Entre os valores de inclinação 0° e 30°, verifica-se, para a composição A-5D, uma pequena diminuição do valor da força máxima. Já na composição B-5D, o valor mantém-se praticamente constante. Por fim, nas fibras 4D, o valor da força desce muito ligeiramente.

Neste estudo, a progressão da força máxima da fibra não está de acordo com os pressupostos apresentados no capítulo 3.3, pois, face ao incremento das tensões resistidas pela fibra, associado ao efeito de *snubbing*, característico de orientações próximas dos 30° , era expectável o aumento de tensões nesta situação, o que não se verificou. Porém deve ser tido em conta que esse comportamento típico foi descrito para fibras convencionas, com uma extremidade de ancoragem simples. Conforme já foi referido em capítulos anteriores, as fibras 5D são constituídas por um gancho de ancoragem que otimiza a aderência ao betão. Deste modo, uma possível explicação para o comportamento observado no presente trabalho, reside na sua superior capacidade de ancoragem, que lhe confere uma resistência ao arrancamento que se sobrepõe à promovida pelo efeito de *snubbing* sendo, assim, mais vantajosa uma situação de tração direta.

Por outro lado, durante o ensaio, a composição de betão A mostrou-se bastante mais aderente à fibra do que a composição B, o que levou a que a fibra incorporada na matriz A resistisse a forças mais elevadas, em especial para os 0° de inclinação.

Relativamente às fibras 4D, a maior particularidade no seu comportamento, em relação às restantes, é a força máxima suportada, independentemente da inclinação, ser notavelmente mais baixa.

Analisando agora o deslizamento na força máxima, verificou-se que nas composições A-4D e B-5D ele aumentou com a inclinação, sendo que este aumento foi gradual para a composição A-4D. Já para a B-5D, o aumento variou consoante a inclinação, sendo muito mais acentuado dos 30° para os 60° .

Nas fibras A-5D o comportamento é notoriamente distinto. Apesar de ter havido um aumento considerável do deslizamento entre os 0° e os 30° , mantém-se praticamente constante entre os 30° e os 60° . A justificação para o facto de o deslizamento na força máxima ser inferior ao esperado para estas inclinações, está possivelmente associada ao facto de se ter observado, para esta composição, um destacamento do betão inferior, traduzido pelo afastamento observado na fase inicial dos diagramas relativos às composições A-4D e A-5D, face ao da B-5D (Figura 7.2).

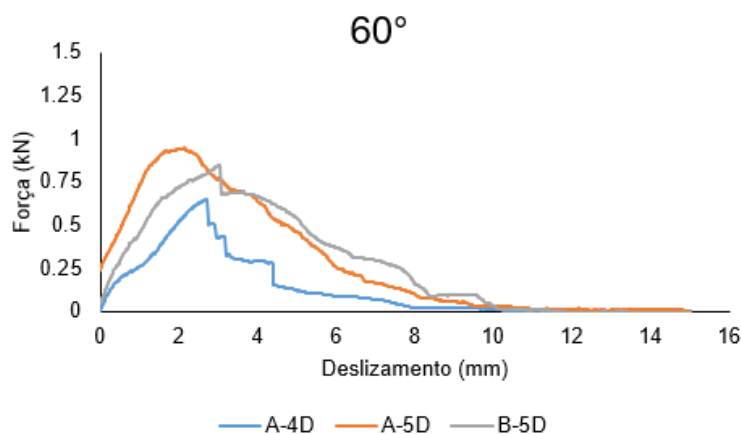
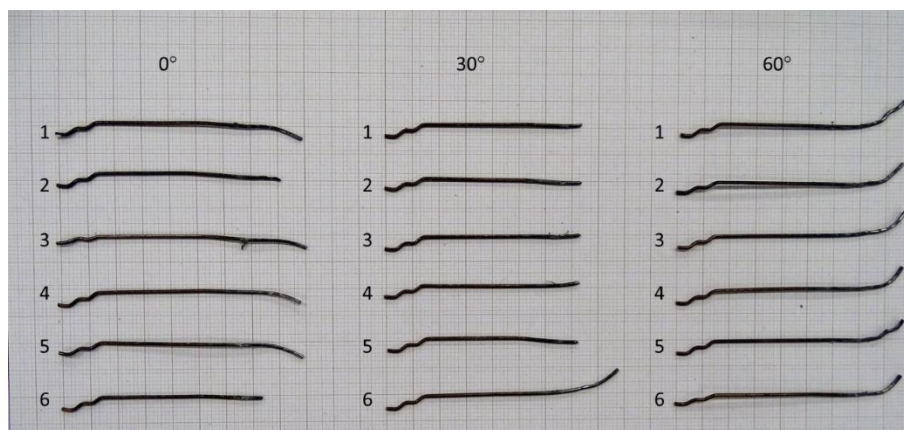


Figura 7.2: Diagramas médios do ensaio de *pull-out* para os 60° de inclinação e $l_e=15$ mm.

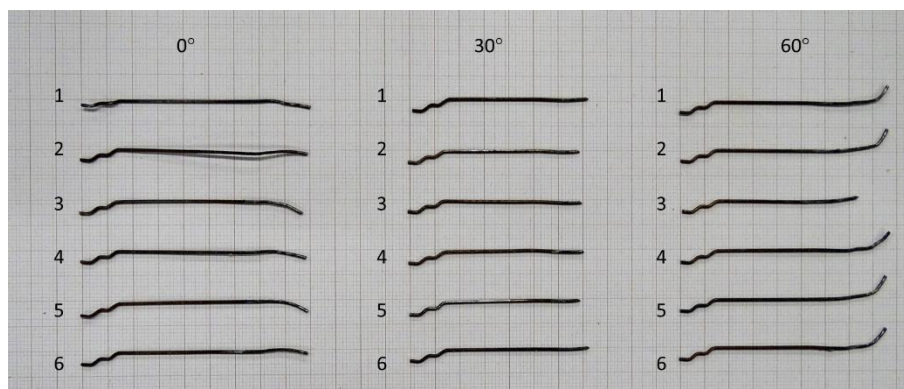
Na Figura 7.3 apresentam-se as fibras após serem submetidas ao ensaio de *pull-out*. Na sua análise verifica-se um padrão de deformação conforme as várias inclinações. Assim, as fibras orientadas verticalmente (0°) apresentam, de um modo geral, o gancho totalmente endireitado e, em alguns casos, deformação plástica que pode ser explicada pela proximidade a agregados de maiores dimensões. Já no

caso das fibras inclinadas a 30° , tal como o esperado, estas apresentam, como modo de rotura predominante, a quebra do aço da fibra. Como referido anteriormente, a explicação para este fenómeno reside na combinação de esforços de tração, corte e momentos flectores a que a fibra está sujeita.

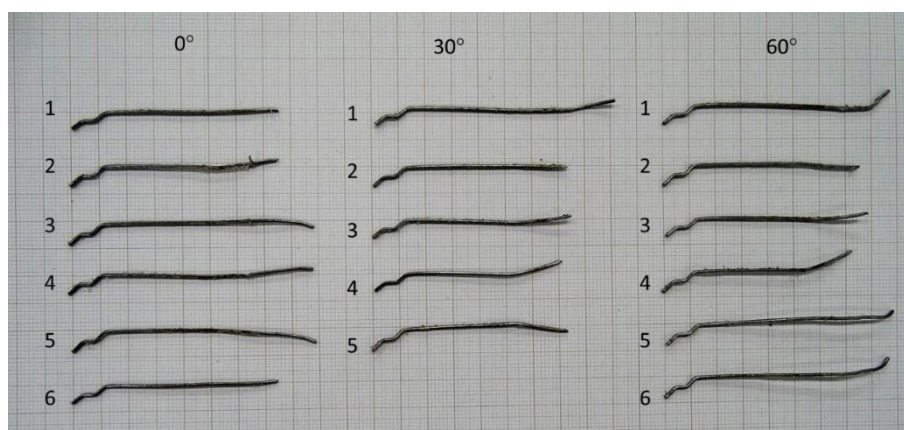
Por fim, verifica-se que nas inclinações de 60° as fibras foram, na sua maioria, arrancadas apresentando uma deformação plástica característica, ou seja, tendem a deformar-se originando uma curvatura na extremidade.



A-5D



B-5D



A-4D

Figura 7.3: Aspeto das fibras após ensaio de *pull-out*.

Os comportamentos atrás anunciados apresentam uma repetibilidade considerável nas fibras 5D. No entanto, as fibras 4D distinguem-se destes padrões de deformação pois, nas três inclinações, pelo menos metade das fibras rompeu em resultado do seu diferente funcionamento no reforço.

Na Figura 7.4 é feita uma comparação dos comportamentos das composições A-5D e B-5D no ensaio de pull-out. De um modo geral verificou-se que as fibras se comportaram de forma semelhante em ambas as composições, sendo que para a composição A (composição com valor mais alto de resistência à compressão) o valor da força máxima de arrancamento foi ligeiramente superior, o que leva a crer que, em condições de boa aderência, um aumento da resistência à compressão do betão pode conduzir a valores maiores de força de arrancamento. Contudo este efeito é menos notório para valores elevados de inclinação da fibra devido ao efeito de *spalling* associado.

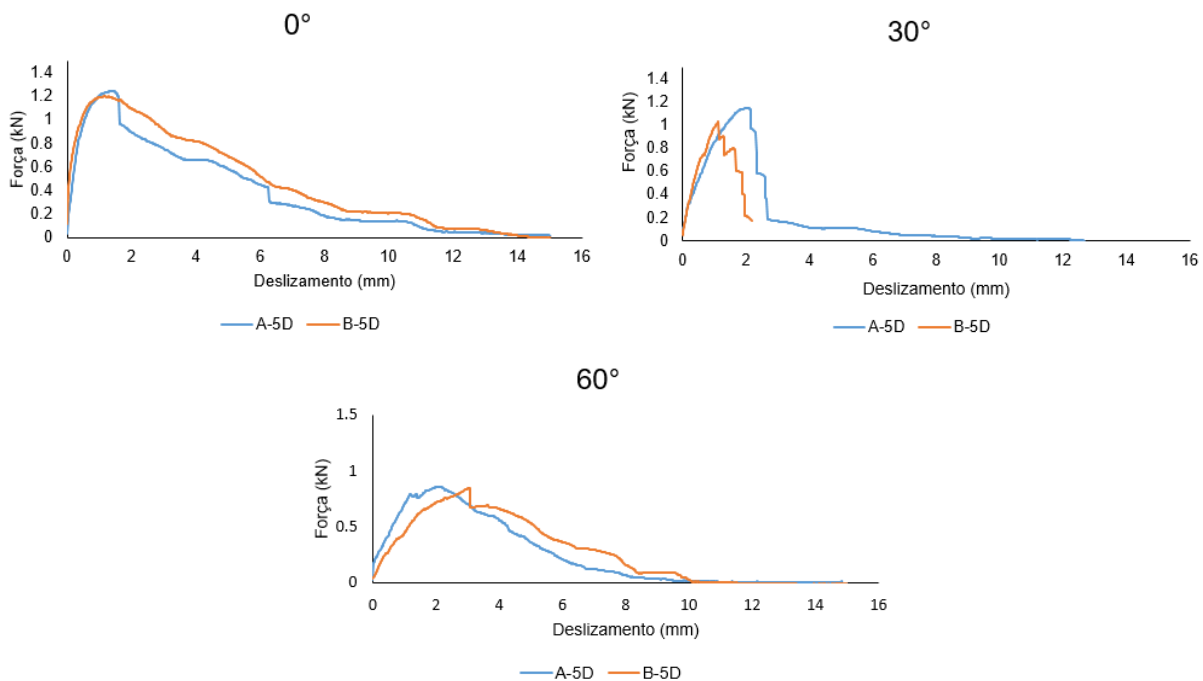


Figura 7.4: Diagramas médios do ensaio de *pull-out* das composições A-5D e B-5D com um $l_e=15$ mm.

Na Figura 7.5 é feita uma comparação do comportamento no ensaio de *pull-out* para os dois valores de l_e adotados neste trabalho e para as várias inclinações.

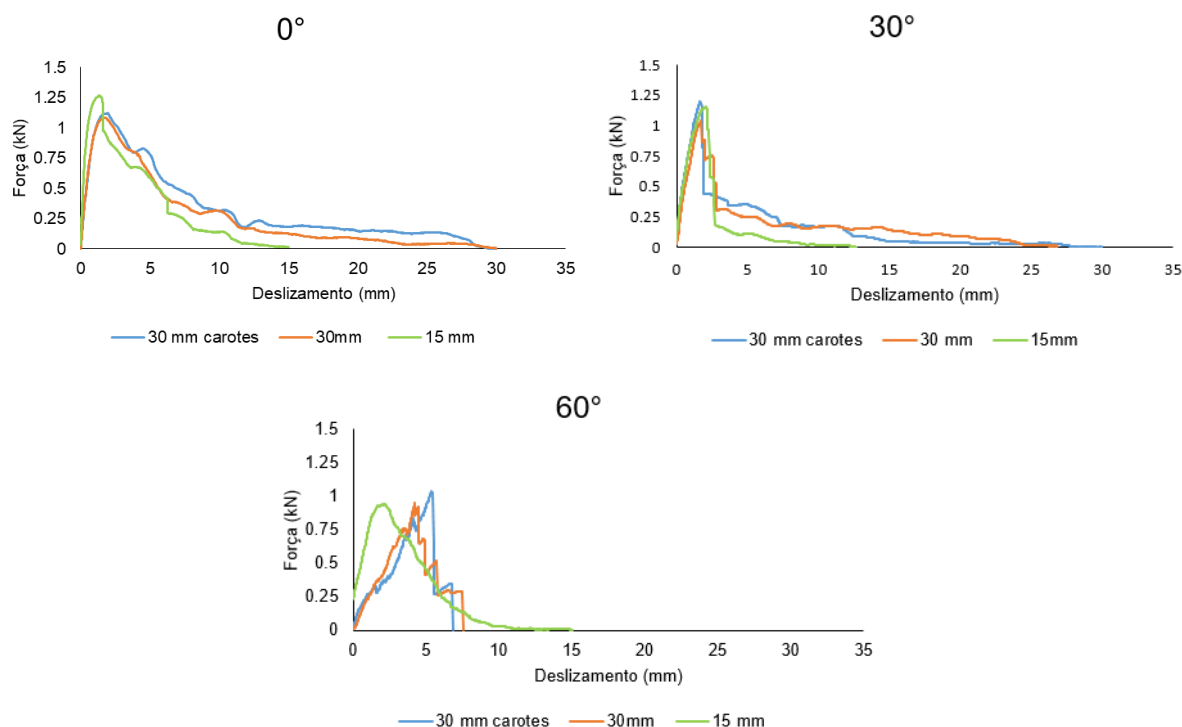


Figura 7.5: Diagramas médios do ensaio de *pull-out* relativos à composição A para os $l_e = 15$ e 30 mm.

Para a variável l_e não foi possível retirar conclusões sobre o efeito que este tem na força máxima. Como foi referido no capítulo anterior, a impossibilidade de garantir uma vibração uniforme em todo o molde, levou a que a aderência fosse mal conseguida na composição A-5D, com 30 mm de fibra incorporada no betão. Deste modo, os resultados foram inconclusivos.

Deve apenas salientar-se que, apesar desta contrariedade na realização dos ensaios, foi possível observar uma alteração do modo de rotura exibido nas fibras com orientação de 60° e l_e de 30 mm, que partiram na força máxima de arrancamento, contrariamente ao observado na maioria das fibras embebidas 15 mm no betão, que foram arrancadas.

Na Figura 7.6 é feita uma comparação do comportamento dos dois modelos de fibra no ensaio de *pull-out*.

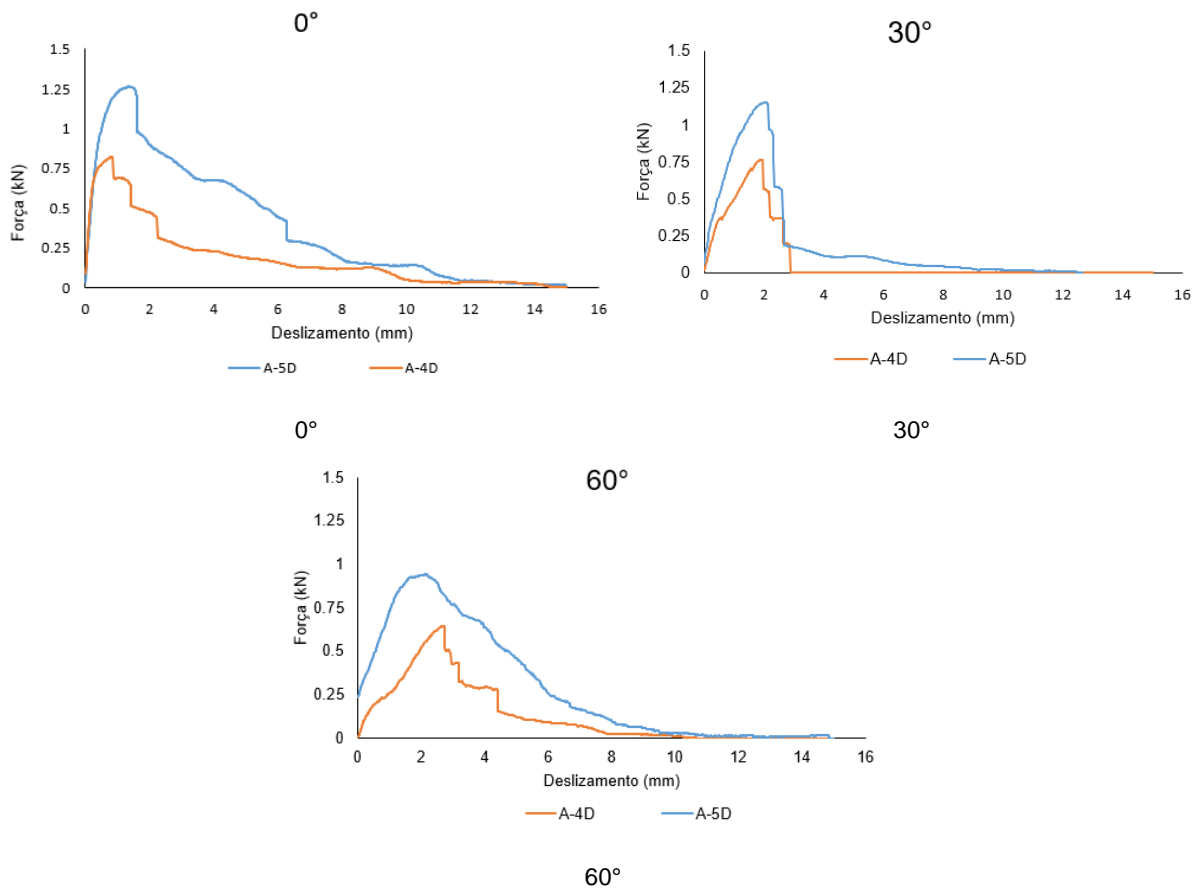


Figura 7.6: Comparação do comportamento das fibras 4D e 5D no ensaio de *pull-out*, para um $l_e=15$ mm.

Comparando os diagramas relativos aos dois modelos de fibras, nas três inclinações, é notória a diferença de capacidade resistente das fibras, sendo que as fibras 5D suportam valores de força consideravelmente superiores. Por outro lado, nas inclinações de 30° e 60° observa-se, na fase inicial dos diagramas de ensaio, um afastamento da curva relativa às fibras 4D face à curva obtida para as fibras 5D. Assim, para o mesmo valor de força, o deslizamento das fibras 4D é superior, demonstrando que, para este modelo, a ancoragem não é conseguida de igual forma. Observou-se durante os ensaios que, nos provetes com fibras 4D inclinadas, ocorreu maior destacamento do betão superficial (*spalling*) do que nos provetes com fibras 5D inclinadas. Assim, a menor inclinação do ramo ascendente da curva força-deslizamento para as fibras 4D pode ser justificada pela incapacidade do gancho 4D para assegurar a ancoragem da fibra quando acontece esse efeito de *spalling*.

A combinação destes resultados com o facto de um elevado número de fibras ter exibido rotura, leva a que se conclua que a utilização deste tipo de fibra (4D) em composições de betão como a A, não é adequada. Um betão de elevada resistência e aderência à fibra não permite o seu normal funcionamento, uma vez que origina uma força de amarração no gancho de ancoragem, de tal forma elevada, que não lhe permite a deformação necessária para garantir a sua eficácia.

Com o objetivo de melhor compreender a influência das propriedades da matriz cimentícia no comportamento ao *pull-out*, compara-se na Tabela 7.1 os resultados obtidos para as composições A-5D e B-5D com os resultados alcançados no trabalho de Abdallah e Fan (2017) para a composição UHPM,

referida no capítulo 3. Consideram-se apenas os resultados para a inclinação de 0° porque essa foi a única estudada por Abdallah e Fan (2017).

Tabela 7.1: Comparação do valor médio da força máxima de arrancamento em fibras 5D obtido nas composições A e B e no trabalho de Abdallah e Fan (2017).

| Composição | Fibras 5D | | |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | B-5D $f_c = 78,7\text{MPa}$ | A-5D $f_c = 96\text{ MPa}$ | UHPM $f_c = 148\text{ MPa}$ |
| $F_{\text{máx}} (pull-out)$ | 1,21 | 1,271 | 1,181 |
| C.V. (%) | 5,4 | 4,4 | 4,7 |

Esperava-se que o valor da carga aumentasse com o aumento da resistência à compressão do betão, o que não se verificou. A resistência à compressão do betão utilizado no trabalho de Abdallah e Fan (2017) foi bastante superior à adotada nesta campanha experimental. Porém, a composição A-5D apresentou o maior valor de força máxima de *pull-out*, mesmo não sendo a sua matriz a de maior classe de resistência. Tendo em conta os resultados obtidos, uma explicação provável para esta diferença será o facto da aderência entre os componentes ser um fator mais condicionante do comportamento do compósito do que a classe de resistência do mesmo. Isto porque, independentemente da classe de resistência do betão, não estando os dois componentes em boas condições de aderência, a fibra não irá oferecer uma grande resistência ao arrancamento.

7.3. INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRA E MATRIZ UTILIZADA NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO POR FLEXÃO

A Figura 7.7 apresenta a média dos diagramas de ensaio para as várias composições.

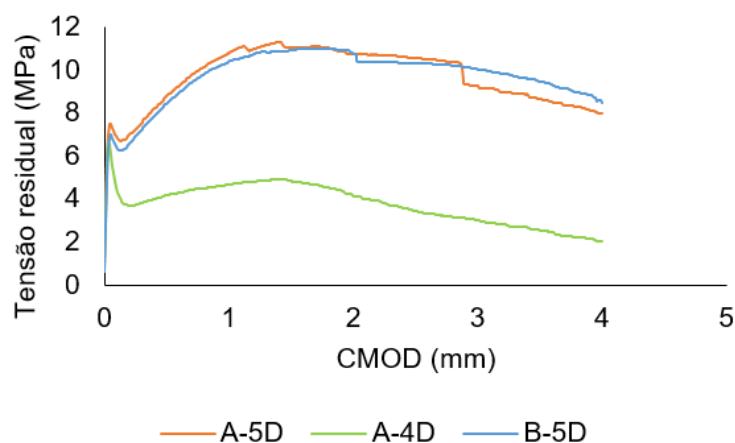


Figura 7.7: Diagramas médios do ensaio de *pull-out* para as várias composições.

Da análise do diagrama pode-se constatar que a curva correspondente à composição A-4D, imediatamente após terminar a fase elástica, isto é, após o aparecimento da primeira fenda, apresenta uma redução abrupta das tensões resistidas, o que indica que as fibras não foram capazes de proporcionar um reforço eficaz.

Estes resultados sugerem que as fibras 4D não são adequadas ao uso em betões desta ordem de resistências. No entanto, é importante ter presente o facto de, nos prismas com fibras 4D ensaiados, o número total de fibras que atravessa a secção de rotura ter sido inferior ao número observado nos prismas com fibras 5D.

Por sua vez, as composições A-5D e B-5D comportaram-se de acordo com o esperado. A A-5D suportou tensões ligeiramente mais elevadas, o que se justifica por se ter conseguido uma melhor aderência dos componentes, bem como pelo facto de apresentar uma matriz cimentícia com uma classe de resistência superior.

8

ANÁLISE INVERSA DOS RESULTADOS

8.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as estimativas obtidas para a curva $\sigma - w$ em tração uniaxial, tendo sido utilizadas duas alternativas para a quantificação dessas curvas:

- análise inversa baseada nos resultados dos ensaios de flexão;
- análise inversa baseada nos resultados dos ensaios de *pull-out* e da análise de imagem.

A análise inversa do ensaio de flexão foi feita usando o modelo apresentado no subcapítulo 4.3. Conforme foi explicado em detalhe nesse subcapítulo, a tensão de tração uniaxial é dada pela soma dos contributos das fibras e do betão. É possível realizar uma análise inversa por cada ensaio de flexão (procedimento seguido no caso das composições A-5D e B-5D). No caso do betão A-4D, foi feita uma única análise inversa, considerando a curva média dos resultados dos ensaios de flexão.

Na análise baseada nos resultados dos ensaios de *pull-out*, para uma dada composição de BRFA, consideram-se como dados:

- a curva média força-deslizamento que foi obtida experimentalmente para cada uma das inclinações, 0°, 30° e 60°;
- os resultados da análise de imagem que fornece, para cada provete, o número total de fibras e a distribuição de orientações;
- a curva $\sigma_c(w)$ determinada na análise inversa do ensaio de flexão.

Combinado estes dados, e introduzindo os parâmetros k_{ef} e $k_{\delta i}$ (cujo significado é explicado a seguir) é possível obter uma estimativa para a curva $\sigma - w$ em tração uniaxial. O objetivo da análise inversa dos ensaios de *pull-out* é então a quantificação dos parâmetros k_{ef} e $k_{\delta i}$ que conduzem a uma curva $\sigma - w$ semelhante aquela que foi obtida na análise inversa do ensaio de flexão. Assim, a análise inversa do ensaio de flexão antecede a análise inversa do ensaio de *pull-out*.

Na análise de imagem, as orientações possíveis situam-se entre os 0° e 90°. Para as fazer coincidir com as orientações utilizadas nos ensaios de *pull-out*, subdividiu-se a gama de orientações possíveis em intervalos: [0°-x]; [x-40°]; [40°-75°]; [75°-90°]. Tendo em conta que a inclinação 30° é a mais condicionante, pois um maior número de fibras atinge a rotura para essa inclinação, foi necessário fazer variar o valor x para conseguir um melhor ajuste da curva $\sigma - w$.

Quando uma peça de BRFA é solicitada por esforços de tração, nem todas as fibras que atravessam a sua secção são efetivas. Por isso, é necessário aplicar um fator redutor, k_{ef} , que relaciona a totalidade

das fibras contadas na secção (por análise de imagem) com a estimativa do número de fibras efetivas no ensaio.

Então, o contributo das fibras, σ_f , para a tensão de tração resistida para um determinado valor da abertura de fenda, w , é dado por:

$$\sigma_f(w) = \sum_{i=0^\circ;30^\circ;60^\circ} \frac{F_i(\delta) n_i k_{ef}}{A_{betão}} \quad (8.1)$$

onde F_i é a força resistida no ensaio de pull-out, para um deslizamento δ em correspondência a abertura de fenda w , n_i é o número total de fibras que atravessa a secção em estudo para o intervalo de inclinações i , e $A_{betão}$ é a área da secção transversal de betão em estudo.

A relação entre o valor de w e o correspondente valor de δ , para as fibras pertencentes ao intervalo de orientações i , é dada por um coeficiente majorativo, $k_{\delta i}$ com valor igual ou superior a 1. Para compreender a necessidade deste coeficiente majorativo, note-se que, no ensaio, apenas uma extremidade da fibra é embebida no betão e, conseqüentemente, apenas essa apresenta deslizamento. Na realidade, numa peça de BRFA, quando uma fibra atravessa uma fissura, ambas as extremidades da fibra estão incorporadas na matriz cimentícia e, como tal, apesar de o deslizamento ser maioritariamente sentido numa das faces da fissura, a face oposta a fibra sofre geralmente um escorregamento que não deve ser desprezado. Como tal, aplicou-se fatores majorativos aos deslizamentos medidos no ensaio de *pull-out*, para cada inclinação. Estes fatores, designados por $k_{\delta 0^\circ}$, $k_{\delta 30^\circ}$ e $k_{\delta 60^\circ}$ variaram num intervalo [1; 1,5].

À semelhança do que é feito na análise inversa dos resultados dos ensaios de flexão, na análise inversa dos resultados dos ensaios de *pull-out* o contributo das fibras, $\sigma_f(w)$ é adicionado ao contributo do betão $\sigma_c(w)$. Considera-se a curva $\sigma_c(w)$ determinada na análise inversa do ensaio de flexão. Note-se que este último apenas se manifesta para valores muito reduzidos da abertura da fissura.

Neste capítulo, os resultados obtidos são apresentados de acordo com a composição de betão a que se referem. Primeiramente são apresentados os coeficientes utilizados na análise inversa dos ensaios de flexão, seguidos dos utilizados na análise inversa dos ensaios de *pull-out*. Por fim, apresentam-se as curvas $\sigma - w$ conseguidas a partir destes modelos.

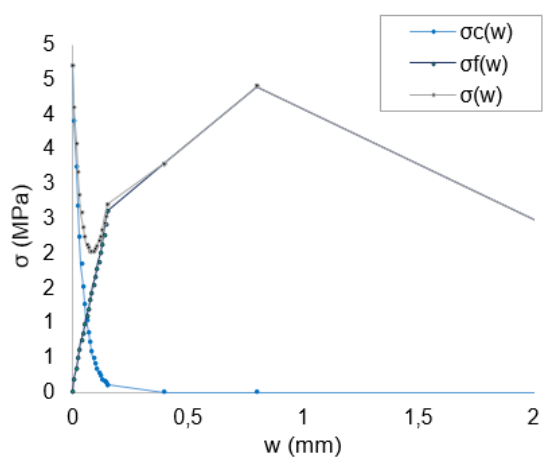
8.2. MISTURA A-5D

A Tabela 8.1 apresenta os resultados da análise inversa dos ensaios de flexão. Os coeficientes que se apresentam nesta tabela são aqueles que caracterizam a curva $\sigma - w$ para valores baixos da abertura de fenda w . Para valores maiores de w , essa curva é definida por uma função multilinear (conforme foi explicado no capítulo 4), sendo essa função o resultado principal da análise inversa. Esse resultado é apresentado abaixo. Na tabela, os valores obtidos são comparados com aqueles que foram considerados por Amin, Foster et al. (2015).

Tabela 8.1: Parâmetros resultantes da análise inversa do ensaio de flexão do betão A-5D.

| | Amin, Foster <i>et al.</i> (2015) | A-5D-1 | A-5D-2 | A-5D-3 | A-5D-4 | A-5D-5 |
|-------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| w_T | | 0,15 | 0,3 | 0,25 | 0,1 | 0,3 |
| c_1 | 1 | 1 | 1 | 0,9 | 1 | 0,8 |
| c_2 | 12 | 25 | 12 | 15 | 25 | 16 |
| a | 2 | 1 | 1,1 | 1,5 | 1.1 | 1 |
| b | 0.5 | 0,8 | 1 | 1 | 0.6 | 0,8 |

A Figura 8.1 ilustra, a título de exemplo, a curva $\sigma - w$ obtida na análise inversa do ensaio A-5D-1, distinguindo a contribuição do betão e das fibras. Para os restantes provetes, será apresentado o resultado da combinação dos dois efeitos, juntamente com os resultados obtidos pela análise inversa do ensaio de *pull-out*. Esta opção teve como objetivo simplificar a apresentação e a comparação dos dois métodos.

Figura 8.1: Curva $\sigma - w$ obtida por análise inversa do ensaio de flexão do provete A-5D-1.

Os intervalos de inclinações adotados para a análise inversa do ensaio de pull-out da composição A-5D, bem como os valores da contagem (resultado da análise de imagem) para cada intervalo de valores são apresentados na Tabela 8.2.

Tabela 8.2. Resultado da contagem de fibras para cada intervalo de inclinações.

| Provete | A-5D-1 | A-5D-2 | A-5D-3 | A-5D-4 | A-5D-5 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| [0°-30°] | 82 | 83 | 84 | 71 | 67 |
| [30°-40°] | 45 | 39 | 52 | 44 | 39 |
| [40°-75°] | 38 | 40 | 40 | 41 | 36 |
| [75°-90°] | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |

Os coeficientes determinados na análise inversa do ensaio de pull-out são indicados na Tabela 8.3. Os parâmetros $k_{\delta i}$ mantiveram-se constantes para todos os provetes. O coeficiente k_{ef} está dependente dos valores obtidos no ensaio de flexão, bem como dos resultados da contagem de fibras para cada intervalo de valores. Deste modo, para um melhor ajuste da curva relativa ao provete A-5D-4, utilizou-se um valor superior deste coeficiente, justificável pelo facto de o provete ter suportado valores elevados de tensões no ensaio de flexão.

O provete A-5D-3 foi o que suportou valores mais altos de tensões no ensaio de flexão. No entanto, uma vez que o valor da contagem de fibras para cada intervalo foi também elevado, não foi necessária uma variação de k_{ef} no caso desse provete.

Tabela 8.3: Coeficientes determinados na análise inversa do ensaio de pull-out do betão A-5D.

| Provete | Deslizamento | | | k_{ef} |
|---------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| | $k_{\delta 0^\circ}$ | $k_{\delta 30^\circ}$ | $k_{\delta 60^\circ}$ | |
| A-5D-1 | 1 | 1 | 1,2 | 0,6 |
| A-5D-2 | | | | |
| A-5D-3 | | | | |
| A-5D-5 | | | | 0,7 |
| A-5D-4 | | | | |

As curvas $\sigma - w$ obtidas por análise inversa do ensaio de flexão e do pull-out são apresentadas na Figura 8.2.

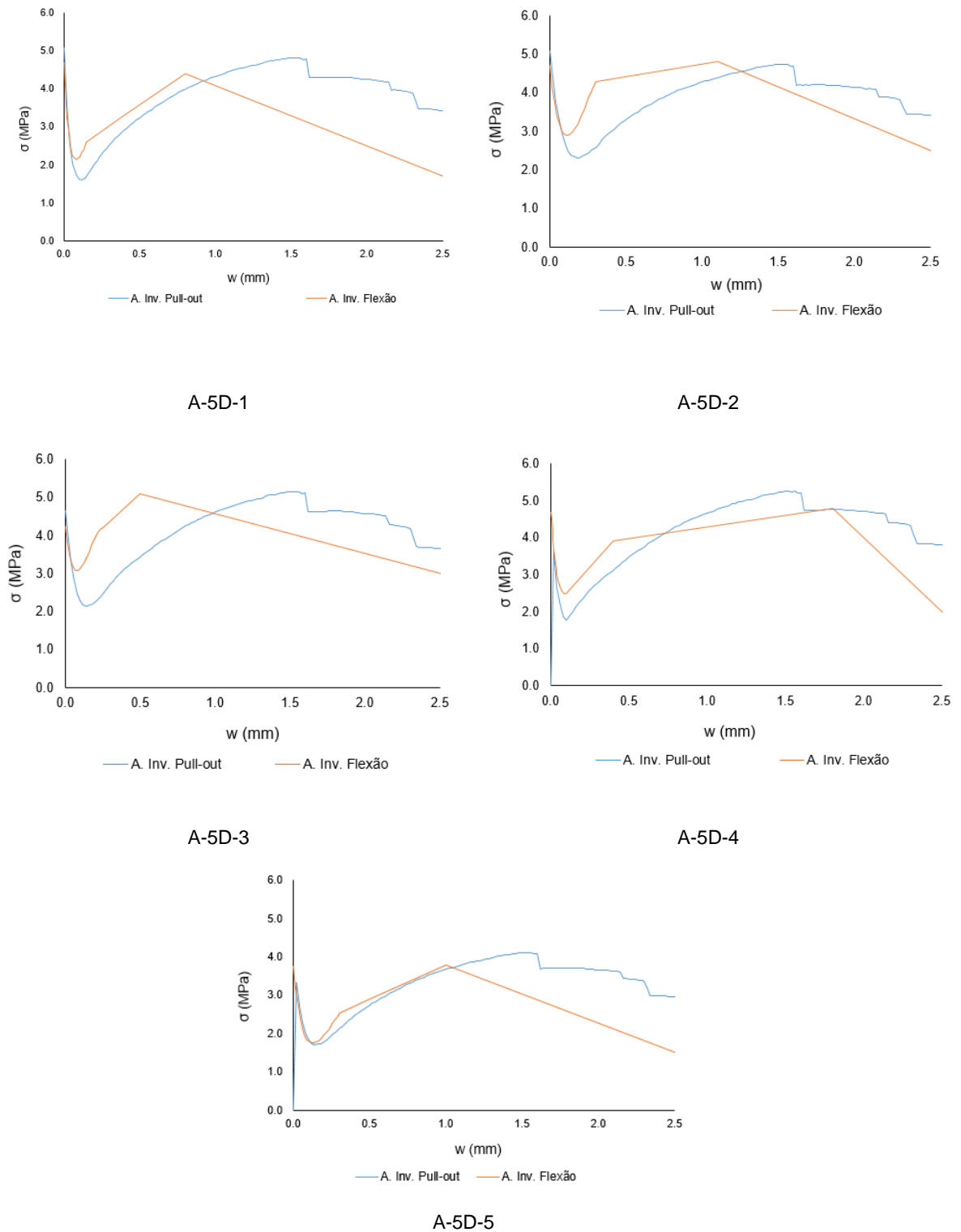


Figura 8.2: Curva $\sigma - w$ obtida por análise inversa dos ensaios de tração por flexão e *pull-out*.

De um modo geral, conseguiu-se uma aproximação razoável entre os resultados dos dois tipos de análise. No entanto, a análise baseada nos ensaios de pull-out tende a subestimar a tensão σ para valores de w inferiores a cerca de 1mm e a sobrestimá-la para valores de w superiores.

8.3. MISTURA A-4D

Na mistura A-4D, optou-se por fazer a análise inversa considerando apenas a curva média que resultou do ensaio de flexão dos vários provetes. Os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 8.4.

Tabela 8.4: Parâmetros obtidos na análise inversa do ensaio de flexão do betão A-4D.

| | Amin, Foster <i>et al.</i> (2015) | A-4D |
|-------|--------------------------------------|------|
| w_T | | 0,15 |
| c_1 | 1 | 1 |
| c_2 | 12 | 25 |
| a | 2 | 1 |
| b | 0,5 | 0,8 |

Conforme foi referido atrás, na composição A-4D observou-se após o ensaio de flexão que a distribuição de fibras ao longo dos provetes não foi uniforme, pois o número de fibras que atravessou a secção do entalhe, foi muito inferior ao teoricamente previsto, utilizando uma dosagem de 50 Kg/m³. Por este motivo, optou-se por focar o estudo nesta secção, não tendo sido realizada análise de imagem.

Assim sendo, a análise inversa do ensaio de pull-out foi realizada tendo por base o número total de fibras na secção do entalhe (resultado da contagem realizada após cada ensaio de flexão). Para que fosse possível a distribuição das fibras em intervalos de orientações e uma vez que se verificou que este valor apresentava uma repetibilidade considerável, utilizou-se o valor médio da percentagem de fibras de cada um dos intervalos [0°-30°], [30°-40°] e [40°-90°], obtidos (nas análises de imagem) para as restantes composições. Deste cálculo, resultaram os valores apresentados na Tabela 8.5.

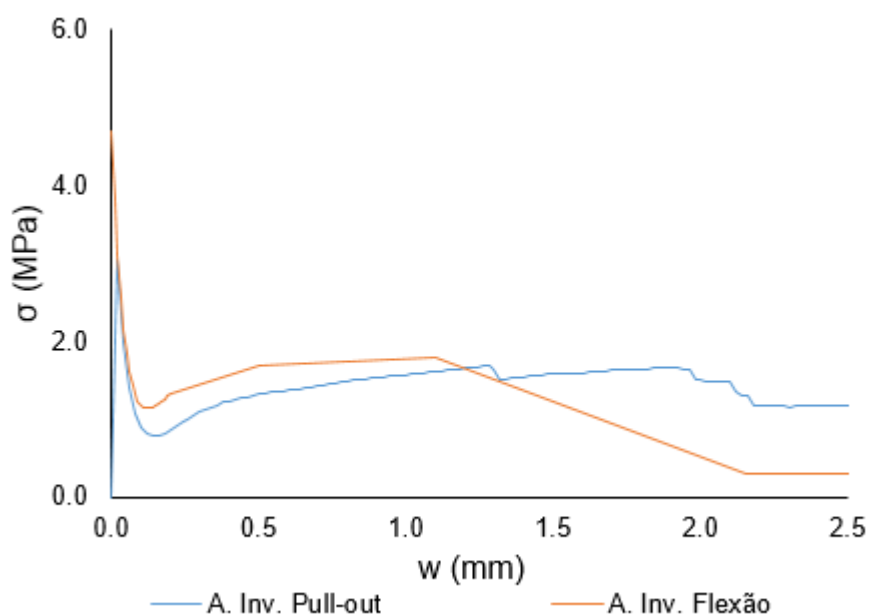
Tabela 8.5. Resultado da contagem de fibras para cada intervalo de inclinações.

| Proвете | A-4D |
|-----------|------|
| [0°-30°] | 25 |
| [30°-40°] | 14 |
| [40°-75°] | 11 |
| [75°-90°] | 1 |

Os coeficientes determinados na análise inversa são apresentados na Tabela 8.6 e os diagramas resultantes dessa análise na Figura 8.3.

Tabela 8.6: Parâmetros determinados na análise inversa do ensaio de *pull-out* do betão A-4D.

| Provete | Deslizamento | | | k_{ef} |
|---------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| | $k_{\delta 0^\circ}$ | $k_{\delta 30^\circ}$ | $k_{\delta 60^\circ}$ | |
| A-5D-1 | 1,5 | 1 | 1,5 | 0,8 |

Figura 8.3: Curva $\sigma - w$ obtida por análise inversa dos ensaios de flexão e *pull-out*.

Nesta composição foi necessário utilizar um coeficiente k_{ef} mais elevado, uma vez que o número de fibras para cada intervalo foi notoriamente mais baixo, consequência da distribuição das fibras não ter sido homogénea na secção de betão e, também, devido ao facto da contagem de fibras, neste caso, ter sido feita manualmente, tendo por isso um erro eventualmente mais elevado. Mais uma vez, a análise baseada nos ensaios de *pull-out* conduz, para aberturas de fenda inferiores a cerca de 1mm, a tensões inferiores às obtidas no análise inversa dos ensaios de flexão, e a tensões superiores para valores superiores de w .

8.4. MISTURA B-5D

Os valores médios dos ensaios de caracterização (compressão em cilindros, módulo de elasticidade e tração direta para obtenção de f_{ct}) são necessários para a obtenção da relação $\sigma - w$ por análise inversa dos ensaios de flexão. Uma vez que, para a composição B-5D, apenas foram realizados os ensaios de compressão em cubos e o ensaio de tração direta, o módulo de elasticidade foi obtido analiticamente, recorrendo ao Eurocódigo 2, através da equação:

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm,cilindro}}{10} \right)^{0,3} \quad (8.2)$$

Considerou-se um valor de $f_{cm,cilindro}$ igual ao valor médio obtido para o ensaio de compressão em cubos, uma vez que não se verifica a relação $f_{cm,cilindro} = 0,8f_{cm,cubo}$ para betões de elevada resistência.

Os valores médios adotados para caracterização do betão são indicados na tabela 8.7.

Tabela 8.7: Parâmetros adotados na análise inversa do ensaio de flexão do betão A-5D.

| | B-5D |
|-------------------------|------|
| $f_{cm,cilindro}$ (MPa) | 78,8 |
| E_{cm} (GPa) | 40,9 |
| $f_{ct,m}$ (MPa) | 4,63 |

Os coeficientes obtidos na análise inversa do ensaio de flexão são apresentados na Tabela 8.8.

Tabela 8.8: Parâmetros obtidos na análise inversa do ensaio de flexão do betão B-5D.

| Provete | B-5D-2 | B-5D-3 | B-5D-4 | B-5D-5 | B-5D-6 | B-5D-7 | B-5D-8 | B-5D-9 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| w_T | 0,15 | 0,15 | 0,1 | 0,1 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| c_1 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| c_2 | 25 | 25 | 19 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| a | 1 | 1 | 1,3 | 1 | 1,5 | 1,5 | 1,2 | 1,2 |
| b | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,8 |

Os intervalos de inclinações utilizados nesta composição, bem como a respetiva contagem de fibras, necessários à análise de *pull-out*, são apresentados na Tabela 8.9.

Tabela 8.9. Resultado da contagem de fibras para cada intervalo de inclinações.

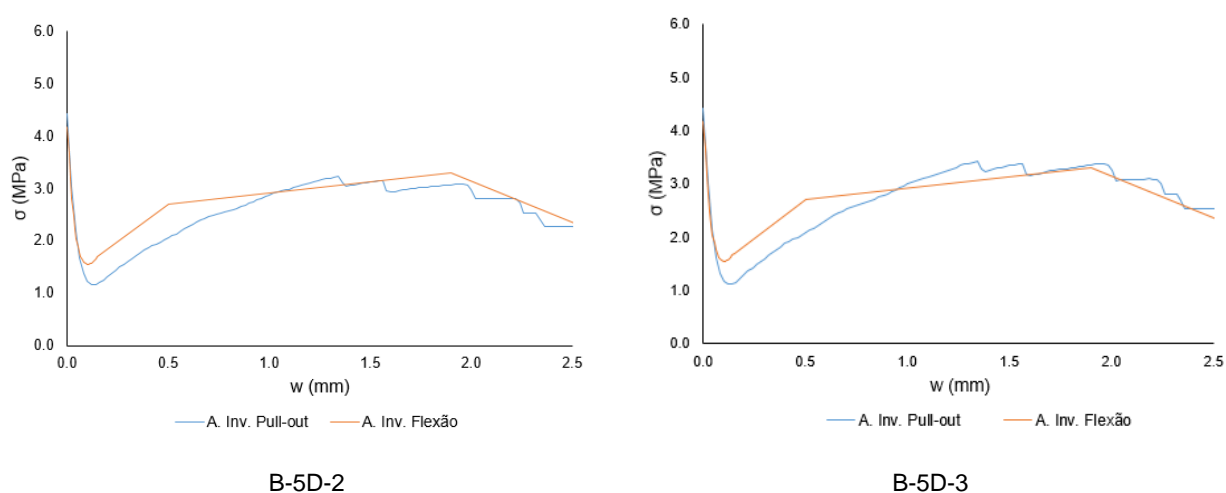
| Provete | B-5D-2 | B-5D-3 | B-5D-4 | B-5D-5 | B-5D-6 | B-5D-7 | B-5D-8 | B-5D-9 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| [0°-30°] | 51 | 27 | 58 | 67 | 46 | 81 | 72 | 79 |
| [30°-40°] | 64 | 50 | 76 | 83 | 67 | 80 | 77 | 102 |
| [40°-75°] | 41 | 55 | 38 | 40 | 36 | 47 | 34 | 33 |
| [70°-90°] | 2 | 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 | 2 |

Nesta composição, para a análise inversa do ensaio de pull-out, mais uma vez, para todos os provetes, os parâmetros corretivos adotados para o deslizamento mantiveram-se constantes, variando apenas o valor de k_{ef} . Deste modo, os vários provetes podem ser divididos em três grupos consoante o valor utilizado. Os parâmetros utilizados para cada provete são indicados na Tabela 8.10.

Tabela 8.10: Parâmetros adotados na análise inversa do ensaio de *pull-out* do betão B-5D.

| Proвете | Deslizamento | | | k_{ef} |
|---------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| | $k_{\delta 0^\circ}$ | $k_{\delta 30^\circ}$ | $k_{\delta 60^\circ}$ | |
| B-5D-2 | 1,5 | 1,2 | 1,2 | 0,5 |
| B-5D-7 | | | | |
| B-5D-9 | | | | |
| B-5D-5 | | | | 0,6 |
| B-5D-8 | | | | |
| B-5-D-3 | | | | 0,7 |
| B-5D-4 | | | | |
| B-5D-6 | | | | 0,8 |

Os resultados obtidos para a análise inversa do ensaio de flexão e de pull-out são apresentados na Figura 8.4.

Figura 8.4: Curva $\sigma - w$ obtida por análise inversa dos ensaios de tração por flexão e pull-out.

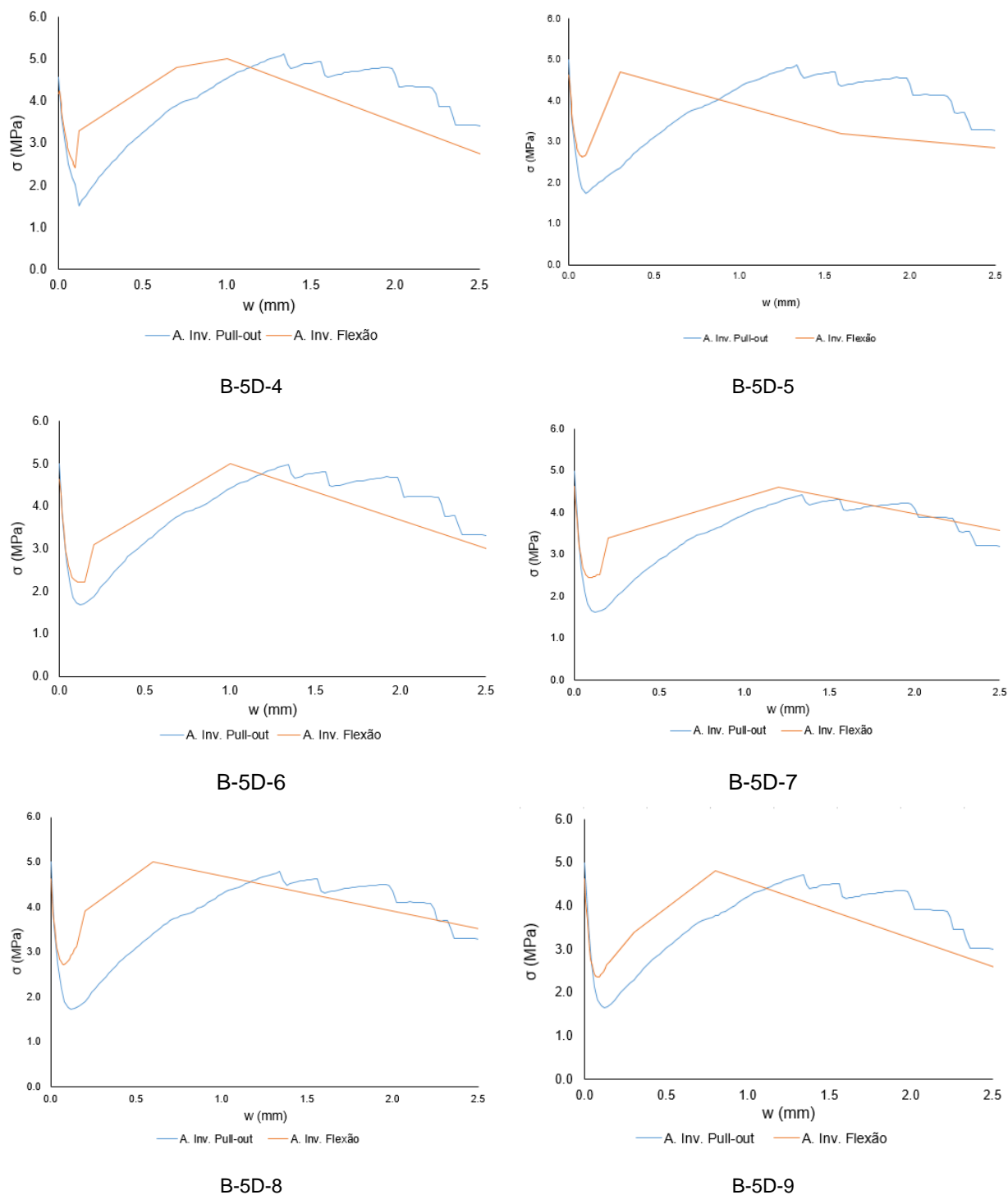


Figura 8.4: Curva $\sigma - w$ obtida por análise inversa dos ensaios de tração por flexão e pull-out.

De um modo geral, foi possível uma aproximação razoável dos diagramas referentes à análise inversa de ambos os ensaios.

8.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Comparando os valores obtidos na análise inversa do ensaio de flexão, para as várias composições de BRFA e para os vários provetes (Tabela 8.11), consegue-se observar que estes exibem valores bastante próximos. Destaca-se mais uma vez que o resultado principal desta análise não são estes parâmetros, mas sim a relação $\sigma_f - w$ que caracteriza o contributo das fibras para valores de w superiores a w_T .

Tabela 8.11: Parâmetros obtidos na análise inversa do ensaio de flexão do betão B-5D.

| Provete | A-5D | | | | | A-4D | B-5D | | | | | | | | |
|---------|------|-----|------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| w_T | 0,15 | 0,3 | 0,25 | 0,1 | 0,3 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,1 | 0,1 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | |
| c_1 | 1 | 1 | 0,9 | 1 | 0,8 | 1 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| c_2 | 25 | 12 | 15 | 25 | 16 | 25 | 25 | 25 | 19 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | |
| a | 1 | 1,1 | 1,5 | 1,1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,3 | 1 | 1,5 | 1,5 | 1,2 | 1,2 | |
| b | 0,8 | 1 | 1 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | |

Na análise inversa do ensaio de *pull-out*, considerando que o coeficiente k_{ef} é afetado pela distribuição das fibras ao longo do provete. Se esta não for homogénea, o número de fibras em cada secção de betão varia, tendo, por isso, de se modificar este coeficiente para conseguir um bom resultado.

Por sua vez, no que se refere aos parâmetros corretivos do deslizamento, é feita uma comparação dos valores utilizados nas várias composições na Tabela 8.12.

Tabela 8.12: Parâmetros obtidos na análise inversa do ensaio de *pull-out*.

| Proвете | Deslizamento | | |
|---------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | $k_{\delta 0^\circ}$ | $k_{\delta 30^\circ}$ | $k_{\delta 60^\circ}$ |
| A-5D | 1 | 1 | 1,2 |
| A-4D | 1,5 | 1 | 1,5 |
| B-5D | 1,5 | 1,2 | 1,5 |

Observando a Tabela 8.12, pode-se constatar que em todas as composições foi necessário utilizar um valor mais baixo para o parâmetro $k_{\delta 30^\circ}$, pois uma elevada percentagem de fibras encontrou-se, na maioria das situações, no intervalo de $[20^\circ, 40^\circ]$ de inclinação.

Por outro lado, foi possível utilizar um valor mais alto para este parâmetro na composição B-5D. Nos ensaios de *pull-out*, esta composição apresentou os valores mais baixos para o deslizamento nas inclinações de 0° e 30° , tendo, por isso, maior margem para utilização de coeficiente mais elevados.

9

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Do trabalho experimental resultante desta dissertação, em termos de comportamento e mecanismos de reforço associados ao BRFA, as principais conclusões que se conseguem obter são:

- Nos ensaios de *pull-out* e nas condições em que os mesmos foram realizados, verificou-se que nas fibras 5-D, inclinações superiores (30°) não originaram um aumento da força máxima de arrancamento face ao que aconteceu para uma inclinação de 0° . Assim, o aumento da força de amarração, associado à geometria de ancoragem otimizada deste modelo de fibras, sobrepõe-se ao incremento de tensões proporcionado pelo efeito de *snubbing*, presente em orientações diferentes de 0° .
Considerando que os estudos realizados sobre este as fibras Dramix 5D são ainda diminutos, devem ser feitos novos estudos em diferentes tipos de matriz cimentícia e diferentes configurações de ensaio que permitam um conhecimento mais sólido do seu funcionamento;
- Ainda nos ensaios de *pull-out*, pode-se constatar que, por si só, um aumento da classe de resistência do betão não garante uma força máxima de arrancamento superior. A aderência mostrou ser um parâmetro fundamental ao bom comportamento do BRFA, e a classe de resistência não é por si só um indicador de boa aderência. Face ao exposto, deve ter-se presente que o uso de uma quantidade de finos adequada, entre os quais adições de qualidade, promove uma boa aderência.
- O modelo de fibra Dramix 4D não se adequa ao uso em composições de classe de resistência semelhante à da composição A. Um betão de elevada resistência exibe uma aderência no gancho de extremidade de tal forma elevada que não permite a sua deformação conforme seria desejável, impedindo a combinação do funcionamento pelo corpo e pelo gancho de extremidade associada a estas fibras. Por outro lado, como o aço que materializa a fibra tem uma ductilidade muito inferior à exibida pelo modelo 5D, verificou-se que as fibras 4D atingem a rotura do aço para uma abertura de fenda consideravelmente inferior. Assim, pode-se concluir que a composição de betão deve ser adequada ao tipo de fibra utilizado.
- Relativamente ao modo de rotura, constatou-se que, de um modo geral, em fibras com um quarto do seu comprimento embebido no betão, para os 0° e 60° de inclinação, as fibras foram na sua maioria arrancadas, enquanto que para os 30° partiram.
Quando o comprimento de fibra incorporado no betão foi alterado para metade do seu comprimento total, não foi possível retirar conclusões relativamente à força máxima resistida, uma vez que se verificou que a aderência não foi devidamente conseguida, mas ainda assim,

nos 60° graus foi possível observar uma alteração do modo de rotura, uma vez que a totalidade das fibras fraturou na força máxima;

- A análise de imagem permitiu ter uma melhor perceção da distribuição das fibras, observando-se que as etapas associadas ao fabrico do betão afetam consideravelmente a homogeneidade do reforço no betão.
No futuro, sugere-se a realização de mais ensaios fazendo-se variar o procedimento e fabrico dos provetes por forma a melhor compreender a influencia de cada etapa na homegeneidade da distribuição das fibras no betão.
- Conseguiu-se, na generalidade, uma razoável aproximação dos modelos de previsão do comportamento à tração uniaxial do BRFA, por análise inversa do ensaio de flexão e do ensaio de *pull-out*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdallah, S.eM. Fan, (2017). *Anchorage mechanisms of novel geometrical hooked-end steel fibres*. Materials and structures, 139, 50,2.
- Abrishambaf, A., (2015). *Creep behaviour of cracked steel fibre reinforced self-compacting concrete laminar structures*.
- Alwan, J. M., et al., (1999). *Effect of mechanical clamping on the pull-out response of hooked steel fibers embedded in cementitious matrices*. Concrete Science and Engineering, 15-25, 1,1.
- Amin, A., et al., (2015). *Derivation of the σ -w relationship for SFRC from prism bending tests*. Structural Concrete, 93-105, 16,1.
- Barragán, B. E., et al., (2000). *Study of the distribution and orientation of fibers in cast cylinders*. Report for Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete, EU Contract-BRPR-CT98-813,
- Bartos, P. J. M.eM. Duris, (1994). *Inclined tensile strength of steel fibres in a cement-based composite*. Composites, 945-952, 25,10.
- Bekaert, N. V. (2012). Reinforcing the Future, N. V. Bekaert S.A.
- Bentur, A.eS. Mindess, (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*. CRC Press,
- Béton, F. I. D., (2013). *fib model code for concrete structures 2010*. Berlin, Germany,
- Budiansky, B.eJ. C. Amazigo, (1989). *Toughening by aligned, frictionally constrained fibers*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 93-109, 37,1.
- Budiansky, B., et al., (1986). *Matrix fracture in fiber-reinforced ceramics*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 167-189, 34,2.
- DIN (1991). Ensaio para betão. DIN 1048-5 Ensaio para betão endurecido (provete preparados em moldes). .
- Dupont, D., (2003). *Modelling and Experimental Validation of The constitutive Law () σ - ϵ and Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete*. Catholic University of Leuven, Belgium,
- Dupont, D.eL. Vandewalle, (2005). *Distribution of steel fibres in rectangular sections*. Cement and Concrete Composites, 391-398, 27,3.
- Ferreira, N. F. M., (2008). *Influência das características das fibras no desempenho do betão*.
- Groth, P. (2000). Fibre reinforced concrete: fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders, Luleå tekniska universitet.
- Grünwald, S.eJ. Walraven (2002). *High strength self-compacting fibre reinforced concrete: behaviour in the fresh and hardened state*. 6th International Symposium on HSC/HPC.
- H. Stang, Z. L., z and S. P. Shah, (1990). *Pullout Problem: stress cersus fracture mechanical approach*
- Htut, T. N. S. (2010). Fracture processes in steel fibre reinforced concrete, The University of New South Wales Sydney, Australia.
- Igarashi, S., et al., (1996). *Microhardness testing of cementitious materials*. Advanced Cement Based Materials, 48-57, 4,2.
- IPQ (2008). Fibras de aço, definições, especificações e conformidade NP EN 14889-1 Fibras para betão. Caparica: Instituto Português da Qualidade

- Jenq, Y.eS. Shah (1986). *Application of two parameter fracture model to concrete and fiber reinforced concrete*. Fracture toughness and fracture energy of concrete. Proceedings of the International Conference on Fracture Mechanics of Concrete.
- Kooiman, A.eC. Walraven, (2000). *Modelling the post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete for structural design purposes*.HERON, vol. 45 (4), 2000,
- Krenchel, H., (1975). *Fibre spacing and specific fibre surface*.Fibre reinforced cement and concrete. The Construction Press, UK, 69-79,
- Laranjeira, F., (2010). *Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete*.Universitat Politècnica de Catalunya,
- Lee, G. G.eS. J. Foster, (2006). *Behaviour of steel fibre reinforced mortar in Shear I: direct shear testing*.
- Li, V. C., (2002). *Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering*.Journal of Applied Polymer Science, 660-686, 83,3.
- Löfgren, I., (2005). *Fibre-reinforced concrete for industrial construction*.Göteborg: Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of technology, t
- Mori, T.eT. Mura, (1984). *An inclusion model for crack arrest in fiber reinforced materials*.Mechanics of Materials, 193-198, 3,3.
- Naaman, A. E., (2003). *Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites*.Journal of advanced concrete technology, 241-252, 1,3.
- Naaman, A. E., et al., (1991). *Fiber pullout and bond slip. I: Analytical study*.Journal of Structural Engineering, 2769-2790, 117,9.
- RILEM, (2003). *TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – σ - ϵ design method – Final recommendation*. Materials and Structures.560-567, Vol. 36,
- Robins, P., et al., (2002). *Pull-out behaviour of hooked steel fibres*.Materials and structures, 434-442, 35,7.
- Rossi, P., et al., (1986). *Comparison between plain concrete toughness and steel fibre reinforced concrete toughness*.Cement and Concrete Research, 303-313, 16,3.
- Selvadurai, A., (1983). *Concentrated body force loading of an elastically bridged penny shaped flaw in a unidirectional fibre reinforced composite*.International Journal of Fracture, 149-159, 21,2.
- Soroushian, P.eC.-D. Lee, (1990). *Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete*.Materials Journal, 433-439, 87,5.
- Stähli, P., et al., (2008). *On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC*.Materials and structures, 189-196, 41,1.
- Stang, H.eS. P. Shah, (1986). *Failure of fibre-reinforced composites by pull-out fracture*.Journal of Materials Science, 953-957, 21,3.
- Stroeven, P.eJ. Hu, (2006). *Effectiveness near boundaries of fibre reinforcement in concrete*.Materials and structures, 1001-1013, 39,10.
- Van Gysel, A., (2000). *Studie van het uittrekgedrag van staalvezels ingebed in een cementgebonden matrix met toepassing op staalvezelbeton onderworpen aan buiging*.

Vanderwalle, M., (2005). *Tunneling is an art*. Bekaert, Belgium.

Voo, J.eS. Foster (2004). 77. Tensile-fracture of fibre-reinforced concrete: variable engagement model. *6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes*, RILEM Publications SARL: 875-884.